

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**CARACTERIZAÇÃO DE FONTES SONORAS E APLICAÇÃO NA**  
**AURALIZAÇÃO DE AMBIENTES**

**Dissertação submetida à**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**para a obtenção do grau de**

**MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**MARCELO SANTOS PORTELA**

**Florianópolis, fevereiro de 2008**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**CARACTERIZAÇÃO DE FONTES SONORAS E APLICAÇÃO NA**  
**AURALIZAÇÃO DE AMBIENTES**

**MARCELO SANTOS PORTELA**

**Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de**

**MESTRE EM ENGENHARIA**

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO VIBRAÇÕES E ACÚSTICA**  
**sendo aprovada em sua forma final.**

---

**Prof. Arcanjo Lenzi, Ph.D. - Orientador**

---

**Prof. Fernando Cabral, Ph.D. - Coordenador do Curso**

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Roberto Jordan, Dr.Eng. - Presidente**

---

**Prof<sup>a</sup>. Elvira Barros Viveiros da Silva, Dr.Eng.**

---

**Prof. Márcio Henrique de Avelar Gomes, Dr.Eng.**

**“Quem conhece o segredo dos sons  
conhece o mistério da totalidade do universo”.  
Hazrat Inayat Khan.**



## AGRADECIMENTOS

Este trabalho não teria sido possível sem a ajuda, dedicação e orientação de uma série de pessoas.

À minha família, por continuar sendo essa base sólida e segura onde posso sempre tomar impulso para novas etapas da vida.

À carinhosa e paciente namorada Gabriela, que forneceu, mesmo que à distância, a energia fundamental para a motivação de meu esmero nessa dissertação.

Ao “Chefe”, Professor Arcanjo Lenzi, pelo total apoio e confiança que ao longo desses dois anos me proporcionou um ambiente de trabalho excepcionalmente agradável e acolhedor.

Ao mestre Paru, por todas as dicas e pelo suporte em todo o aparato construído.

A toda a equipe do LVA, pelas inúmeras vezes que compareceram carregando alguma placa de madeira pesada, fechando a câmara anecóica ou simplesmente jogando uma “bolinha”.

Ao chileno José, pelos muitos conselhos e por disponibilizar o sistema de gravação intra-auricular e à Mônica, sua esposa, pelos esclarecimentos quanto à análise estatística dos resultados.

Aos companheiros de sala, Marcos, Luís e Fabilson, pelos momentos descontraídos e pelo apoio nas dificuldades.

Aos engenheiros Stephan Paul e Eric Brandão, pelo auxílio nas gravações, na análise dos resultados e pela detalhada revisão deste documento.

A todas as outras pessoas que participaram nos ensaios de avaliação subjetiva.

Ao pesquisador Márcio Avelar, por disponibilizar o programa de simulação acústica de salas e por estar sempre disponível para discutir sobre auralização.

Essas pessoas fantásticas apareceram no meu caminho e me passaram, com muita paciência, ensinamentos teóricos e práticos que estão fazendo parte de minha formação como profissional e como ser humano. Sou muito grato a todos!

Fundamental também foi o apoio de algumas empresas e instituições.

Ao programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, principalmente aos professores, por possibilitarem esse aprendizado.

Ao CNPQ, pelo apoio financeiro.

À Smarttech, por disponibilizar o programa RAYNOISE durante o período de pesquisa.

À Embraco, pelo empréstimo do manequim, usado nas gravações biaurais.

À Electrolux, por ceder o aparelho condicionador de ar para os estudos.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	i
LISTA DE TABELAS .....	v
SIMBOLOGIA .....	vi
RESUMO .....	vii
ABSTRACT .....	viii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1. OBJETIVOS DO TRABALHO.....	2
1.1.1. Gerais .....	2
1.1.2. Específicos.....	2
1.2. CONTEÚDO DOS CAPÍTULOS .....	2
CAPÍTULO 2 - CONCEITOS BÁSICOS.....	4
2.1. CAMPOS SONOROS.....	4
2.2. EQUAÇÃO DA ONDA .....	5
2.3. PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS .....	6
2.3.1. Convolução.....	6
2.3.2. Convolução no domínio da frequência.....	9
2.3.3. Sistemas lineares e resposta impulsiva.....	9
2.4. TECNOLOGIA BIAURAL.....	12
2.4.1. Funções de transferência relacionadas à cabeça – HRTFs .....	13
2.4.2. Técnicas de gravação .....	15
2.4.3. Reprodução via fones de ouvido.....	15
CAPÍTULO 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1. AURALIZAÇÃO .....	17
3.1.1. Modelagem do meio de propagação sonora.....	18
3.1.2. O Método das Fontes Virtuais (FV).....	19
3.1.3. Método de Traçado de Raios (TR).....	21
3.1.4. Método Híbrido ou Método de Traçado de Pirâmides (RN).....	22
3.1.5. Obtenção da resposta impulsiva binaural e apresentação do resultado .....	24
3.2. CARACTERIZAÇÃO DE FONTES SONORAS.....	25
3.2.1. Geração Sonora.....	25
3.2.2. Direcionalidade .....	25
3.2.3. Modelos de direcionalidade em programas de simulação.....	26
3.3. PARÂMETROS DE COMPARAÇÃO.....	27
CAPÍTULO 4 - CARACTERIZAÇÃO DE FONTES SONORAS .....	29
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA FONTE .....	29
4.2. CONSTRUÇÃO DA PAREDE REFLETORA (BAFFLE) .....	30
4.3. MEDIÇÃO DA PRESSÃO SONORA .....	32
4.4. DIAGRAMAS DE DIRECIONALIDADE.....	37

4.4.1.	<i>Direcionalidade do aparelho de ar-condicionado</i> .....	37
4.4.2.	<i>Direcionalidade da voz</i> .....	40
4.4.3.	<i>Direcionalidade do violão</i> .....	43
CAPÍTULO 5 - CADEIA DE GRAVAÇÃO E REPRODUÇÃO .....		46
5.1.	GRAVAÇÕES DE CANAL ÚNICO .....	46
5.2.	GRAVAÇÕES BIAURAIS .....	49
5.3.	REPRODUÇÃO VIA FONES DE OUVIDO .....	51
5.4.	O APARELHO DE AR-CONDICIONADO .....	52
5.4.1.	<i>A gravação da referência</i> .....	52
CAPÍTULO 6 - TÉCNICAS DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO .....		55
6.1.	SIMULAÇÃO DO AMBIENTE .....	55
6.2.	ACÚSTICA GEOMÉTRICA.....	55
6.3.	O PROGRAMA RAYNOISE .....	56
6.3.1.	<i>Caracterização de fontes sonoras</i> .....	57
6.3.2.	<i>Resposta impulsiva binaural</i> .....	57
6.3.3.	<i>Auralização</i> .....	58
6.3.4.	<i>Interface gráfica</i> .....	58
6.4.	O PROGRAMA MÓDULOS.....	59
6.5.	SALA DE REUNIÕES DO LVA .....	61
6.6.	POSIÇÕES DE FONTE E RECEPTOR .....	63
6.7.	CONSIDERAÇÕES SOBRE O APARELHO DE AR-CONDICIONADO .....	64
CAPÍTULO 7 - ANÁLISE DOS RESULTADOS .....		65
7.1.	ANÁLISE SUBJETIVA .....	65
7.1.1.	<i>Análise dos resultados</i> .....	66
7.1.2.	<i>Dados ordinais</i> .....	67
7.1.3.	<i>Dados intervalares</i> .....	71
7.1.4.	<i>Comentários feitos pelos participantes</i> .....	74
7.2.	ANÁLISE OBJETIVA .....	75
7.3.	COMPARAÇÃO DO VOLUME PERCEPTÍVEL .....	81
CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES .....		83
	<i>Sugestões para trabalhos futuros</i> .....	84
REFERÊNCIAS .....		85
APÊNDICES .....		89
APÊNDICE A - DESCRIÇÃO DA CONSTRUÇÃO DA PAREDE REFLETORA (BAFFLE).....		90
APÊNDICE B - DADOS DA GEOMETRIA DA SALA (COORDENADAS CARTESIANAS) .....		91
APÊNDICE C - DADOS DA GEOMETRIA DA SALA (ELEMENTOS E MATERIAIS) .....		92
APÊNDICE D - HISTOGRAMAS – DADOS INTERVALARES .....		94
APÊNDICE E - ESPECTROGRAMAS .....		101
APÊNDICE F - CONTEÚDO DO CD.....		103
APÊNDICE G - FORMULÁRIO PARA RESPOSTAS DA COMPARAÇÃO SUBJETIVA DE SONS .....		105

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Interior de uma câmara anecóica.....	5
Figura 2.2 - Exemplo de convolução entre dois sinais retangulares (a) e (b), com duração $T1$ e $T2$ , gerando em (c) um sinal $y(t)$ .....	8
Figura 2.3 – Resposta Impulsiva aplicada a um Sistema Linear Invariante no Tempo. ....	11
Figura 2.4 – Sistema de coordenadas polares.....	13
Figura 2.5 – <i>HRTFs</i> medidas para diferentes pessoas. ....	14
Figura 2.6 – Manequim ( <i>dummy head</i> ) instrumentado com microfones nos ouvidos. ....	15
Figura 2.7 – Comparação da audição direta <i>versus</i> a cadeia de gravação e reprodução. ....	16
Figura 3.1 – Simplificação da cadeia de processamento do sinal na auralização. ....	18
Figura 3.2 - Ilustração simplificada do princípio do Método de Fontes Virtuais.....	19
Figura 3.3 – Teste de visibilidade para Fontes Virtuais. ....	20
Figura 3.4 – Ilustração em 2D do traçado de um raio. ....	21
Figura 3.5 – Fonte sonora emitindo um feixe piramidal. ....	22
Figura 3.6 – Traçado de Pirâmides: fonte original espelhada na superfície, resultando na imagem que representa o ápice da pirâmide refletida. ....	23
Figura 3.7 – Discretização da frente de onda através das bases triangulares das pirâmides. ....	23
Figura 3.8 – Fala cruzada ( <i>cross-talk</i> ) decorrente da reprodução via alto-falantes.....	25
Figura 4.1 – Modelo simplificado das placas da parede refletora montadas dentro da câmara semi-anecóica. À esquerda, a vista isométrica e, na direita a vista superior. ....	30
Figura 4.2 – Ilustração do projeto da estrutura do <i>baffle</i> .....	31
Figura 4.3 – Estrutura da parede refletora ( <i>baffle</i> ), com o aparelho condicionador de ar instalado, a referência de ângulo horizontal no chão e o sistema arco-haste-microfone montado. ....	32
Figura 4.4 - Representação da posição 13 de microfone.....	33
Figura 4.5 – Diagrama angular horizontal de referência com prumo.....	34
Figura 4.6 - Representação do ponto 15° vertical - 90° horizontal. ....	35
Figura 4.7 - Vista lateral do aparato. ....	35
Figura 4.8 – Ilustração do equipamento utilizado. ....	36
Figura 4.9 – Equipamento de medição no interior da câmara. ....	36
Figura 4.10 - Direções convencionadas no diagramas do ar-condicionado. ....	38
Figura 4.11 – Diagramas polares de direcionalidade do aparelho de ar-condicionado, para as bandas de frequência de 125Hz e 250Hz.....	38

Figura 4.12 – Diagramas polares de direcionalidade do aparelho de ar-condicionado, para as bandas de frequência de 500Hz e 1kHz.....	39
Figura 4.13 – Diagramas polares de direcionalidade do aparelho de ar-condicionado, para as bandas de frequência de 2kHz e 4kHz.....	39
Figura 4.14 – Balão de direcionalidade (por interpolação) do aparelho de ar-condicionado, para a frequência de 1kHz. ....	40
Figura 4.15 – Convenções de direção para a voz humana.....	41
Figura 4.16 – Diagramas polares de direcionalidade da voz humana, para as bandas de frequência de 125Hz e 250Hz. ....	41
Figura 4.17 – Diagramas polares de direcionalidade da voz humana, para as bandas de frequência de 500Hz e 1kHz. ....	42
Figura 4.18 – Diagramas polares de direcionalidade da voz humana, para as bandas de frequência de 2kHz e 4kHz. ....	42
Figura 4.19 – Balão de direcionalidade (por interpolação) da voz humana, para a frequência de 4kHz.....	43
Figura 4.20 – Representação das direções convencionadas para os diagramas do violão. ....	43
Figura 4.21 – Diagramas polares de direcionalidade do violão, para as bandas de frequência de 125Hz e 250Hz. ....	44
Figura 4.22 – Diagramas polares de direcionalidade do violão, para as bandas de frequência de 2kHz e 4kHz. ....	44
Figura 4.23 - Balão de direcionalidade (por interpolação) do violão para a frequência de 4kHz. ....	45
Figura 5.1 – Microfone de campo livre montado no interior da câmara. ....	46
Figura 5.4 – Microfone posicionado a 1 m da fonte sonora para as gravações anecóicas do ar-condicionado.....	48
Figura 5.5 – Gravação do violão em câmara semi-anecóica, com microfone a 1m de distância. ....	49
Figura 5.6 – Gravação da voz em câmara semi-anecóica, com microfone a 3m de distância. ....	49
Figura 5.7 – Manequim ( <i>dummy head</i> ) para gravação binaural. ....	50
Figura 5.8 – Aparato de gravação binaural do violão na sala de reuniões. ....	50
Figura 5.9 – Aparato de gravação binaural da voz na sala de reuniões.....	51
Figura 5.10 – Ouvinte com fones de ouvido, respondendo ao questionário subjetivo interativo. ....	52
Figura 5.11 – Mini-microfones inseridos no canal auditivo de uma pessoa para uma gravação intra-auricular. ....	53

Figura 5.12 - Dodecaedro Omnidirecional .....	53
Figura 5.13 - Ilustração do equipamento utilizado nas gravações binaurais de referência do ar-condicionado.....	54
Figura 5.14 - Equipamento montado na sala de reuniões para as gravações binaurais.....	54
Figura 6.1 – Vista do modelo geométrico da sala no programa RAYNOISE.....	59
Figura 6.2 - Ilustração da sala de reuniões no LVA-UFSC.....	61
Figura 6.3 - Vista superior das posições de fonte e receptor para o violão. ....	63
Figura 6.4 - Vista superior das posições de fonte e receptor para a voz. ....	63
Figura 6.5 - Vista superior das posições de fonte e receptor para o aparelho de ar-condicionado.....	64
Figura 7.1 – Escala de linha para ordenamento dos sons em relação à referência (R).....	65
Figura 7.2 – Exemplo do resultado do ensaio subjetivo, com o ordenamento dos sons em relação à referência (R) marcado na escala de linha. ....	66
Figura 7.3 – Resultado da análise dos resultados dos dados ordinais para o critério <i>localização</i> do violão e da voz.....	67
Figura 7.4 – Resultado da análise geral dos resultados dos dados ordinais para o parâmetro <i>localização</i> .....	68
Figura 7.5 – Resultado da análise dos resultados dos dados ordinais para o critério <i>reverberação</i> do violão e da voz. ....	68
Figura 7.6 – Resultado da análise geral dos resultados dos dados ordinais para o parâmetro <i>reverberação</i> .....	69
Figura 7.7 – Resultado da análise dos resultados dos dados ordinais para o critério <i>timbre</i> do violão e da voz.....	69
Figura 7.8 – Resultado da análise geral dos resultados dos dados ordinais para o parâmetro <i>timbre</i> .....	69
Figura 7.9 – Classificação geral para o parâmetro Localização conforme dados ordinais. ....	71
Figura 7.10 – Classificação geral para o parâmetro Reverberação conforme dados ordinais..	71
Figura 7.11 - Histograma para o parâmetro Reverberação da fonte voz - Método FV.....	72
Figura 7.12 - Histograma para o parâmetro Localização da fonte violão - Método RN.....	72
Figura 7.13 – Reclassificação para o parâmetro Localização em função da análise dos dados intervalares. ....	74
Figura 7.14 – Reclassificação para o parâmetro Reverberação em função da análise dos dados intervalares. ....	74
Figura 7.15 - Espectros FFT dos resultados do canal esquerdo das simulações e do som de referência. ....	76

Figura 7.16 - Espectros FFT dos resultados do canal direito das simulações e do som de referência. ....	77
Figura 7.17 - Espectros FFT dos resultados do canal esquerdo das simulações e do som de referência para as bandas de 63, 125 e 250 Hz.....	78
Figura 7.18 - Espectros FFT dos resultados do canal esquerdo das simulações e do som de referência, para as bandas de 500, 1000 e 2000 Hz.....	79
Figura 7.19 - Espectros FFT dos resultados do canal esquerdo das simulações e do som de referência, para as bandas de 4000, 8000 e 16000 Hz.....	80
Figura 7.20 – Curvas de <i>loudness</i> específico para os resultados das simulações, em bandas de terço de oitava.....	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Nível de pressão sonora do ruído de fundo medido no interior da câmara semi-anecóica. ....	47
Tabela 6.1 - Coeficientes de absorção usados na simulação computacional, em bandas de oitava. ....	62
Tabela 6.2 - Coordenadas cartesianas em metros das posições de fonte e receptor.....	64
Tabela 7.1 – Verificação de diferenças significativas em dados ordinais. ....	70
Tabela 7.2 – Medianas obtidas das distribuições de dados para os três parâmetros. ....	73
Tabela 7.3 – Verificação de diferenças significativas em dados intervalares. ....	73
Tabela 7.4 – Valores globais para <i>loudness</i> e níveis de pressão sonora dos resultados das simulações. ....	82



## SIMBOLOGIA

### Alfabeto Latino:

$T_{60}$	Tempo de reverberação	[s]
$c$	Velocidade do som no ar	[m/s]
$V$	Volume da sala	[m <sup>3</sup> ]
$S$	Área de superfície interna da sala	[m <sup>2</sup> ]
$f$	Frequência	[Hz]
$T_1$	Duração do sinal retangular $x(t)$	[s]
$T_2$	Duração do sinal retangular $h(t)$	[s]
$Q$	Fator de direcionalidade	
$I$	Intensidade medida da fonte sonora em determinada direção	[W/m <sup>2</sup> ]
$I_{re}$	Intensidade de referência, correspondente à emissão em campo livre	[W/m <sup>2</sup> ]
$D_i$	Índice de direcionalidade	
$k$	Número de onda, dado por $\omega/c$	

### Alfabeto Grego:

$\alpha$	Coefficiente de absorção sonora do material em uma dada frequência	
$\omega$	Frequência angular	[rad/s]
$\lambda$	Comprimento de onda	[m]
$\upsilon$	Ângulo de elevação na HRTF ( <i>zenith</i> )	[grau]
$\varphi$	Ângulo de rotação na HRTF ( <i>azimuth</i> )	[grau]

### Funções:

$\delta(t)$	Delta ou Delta de Dirac
$x(t)$	Função de entrada do sistema linear invariante no tempo
$y(t)$	Função de saída do sistema linear invariante no tempo
$h(t)$	Resposta impulsiva do sistema linear invariante no tempo
$X(\omega)$	Transformada de Fourier da função $x(t)$
$Y(\omega)$	Transformada de Fourier da função $y(t)$
$H(\omega)$	Transformada de Fourier da função $h(t)$

## RESUMO

O objetivo da auralização é proporcionar ao ouvinte uma impressão de como uma fonte soa dentro de um ambiente, mesmo que esse ambiente não exista fisicamente. Existem hoje disponíveis alguns métodos pelos quais é possível modelar o campo acústico associado a uma posição em relação a uma fonte sonora dentro de uma sala. Neste trabalho, os métodos geométricos de modelagem conhecidos como Fontes Virtuais, Traçado de Raios e Traçado de Pirâmides foram utilizados separadamente e seus resultados audíveis foram comparados a um som de referência. Esta referência consiste em uma gravação binaural da fonte feita dentro de uma sala existente, em igual posição considerada na simulação. As fontes sonoras estudadas foram: um aparelho de ar-condicionado, um violão e a voz humana. A sala considerada foi uma sala de reuniões.

Os métodos de Fontes Virtuais e Traçado de Raios foram aplicados nas simulações através de um programa em desenvolvimento chamado MÓDULOS, enquanto o programa comercial de simulação RAYNOISE foi utilizado para aplicar o método de Traçado de Pirâmides. A comparação dos resultados foi realizada por meio de duas diferentes abordagens: comparação subjetiva e análise espectral.

Os resultados permitiram avaliar as vantagens e desvantagens de cada método, bem como identificar as possíveis fontes de incertezas dentro da cadeia de análise que envolve gravação, modelagem computacional, processamento digital de sinais e reprodução via fones de ouvido.

## **ABSTRACT**

The objective of the auralization process is to provide an impression to the listener of how a sound source inside a room would sound like, even if this room doesn't exist. Nowadays there are some methods available by which it is possible to model the acoustic field related to known source and receptor positions inside the room. In this work, the geometric modeling methods known as Image Source Method, Ray-Tracing Method and Beam-Tracing Method were applied and the audible results were compared to a reference sound. This reference is a binaural recording taken inside the real room, in the exact position considered in the simulation. The studied sound sources were: the air-conditioner noise, an acoustic guitar and the human voice. The considered enclosed space was a meeting room.

The Image Source Method and Ray-Tracing Method were applied through MODULOS, software in development, while the Beam-Tracing Method was applied through LMS RAYNOISE software. The comparison of the results was accomplished through two different approaches: subjective comparison and frequency analysis.

Finally, it was possible to evaluate the main advantages and disadvantages of each method, and to identify the possible sources of uncertainties concerning the whole analysis chain, that involves recording, modeling, digital signal processing and reproduction via headphones.

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUÇÃO**

O comportamento do som no interior de um ambiente é um fator importante tanto para o projetista de salas ou equipamentos quanto para o cidadão comum que compra ou usufrui do resultado do projeto. No caso de um produto acoplado a uma sala, como é o caso de um condicionador de ar, o efeito acústico somado à vibração estrutural, considerando o posicionamento e as características da fonte de ruído dentro da sala, são elementos que podem ser estudados através da simulação acústica, conhecida como auralização. O mesmo pode ser aplicado à previsão do campo acústico resultante de um instrumento musical ou da própria voz humana.

É fato que, tanto entre técnicos da indústria quanto entre responsáveis por salas de audição crítica (engenheiros de áudio, operadores de mesa de som), ou mesmo entre músicos, ainda falta orientação quanto ao comportamento acústico do som produzido nos diferentes ambientes. O mesmo se aplica aos projetistas das salas. Alguns projetos arquitetônicos esteticamente elaborados e ousados não apresentam o devido cuidado em relação à acústica. Essa orientação normalmente é feita por especialistas, engenheiros acústicos que, por sua vez, se utilizam de parâmetros acústicos numéricos para representar objetivamente grandezas acústicas envolvidas, tais como  $T_{60}$ , IACC, etc. Mas a comunicação entre o engenheiro, o músico e o arquiteto nem sempre se dá de maneira satisfatória, pois os termos usados são muito específicos, de difícil compreensão e a qualidade subjetiva do som depende de variáveis inter-relacionadas.

Dessa forma, fica evidente a importância de usarem-se meios de comunicação que todos os interessados entendam, tal como uma semântica adequada. Porém, o uso da semântica também gera certos obstáculos, já que engenheiros usam termos técnicos como reverberação, clareza, modulação que, em geral, o leigo não conhece ou interpreta de forma diferente.

É, portanto, necessária outra solução, que aproveite os sentidos que todos os envolvidos têm em comum, como a audição. A auralização proporciona ao ouvinte uma impressão de como uma fonte soa dentro de um ambiente, mesmo que este não exista fisicamente. Essa ferramenta já é viável hoje, sendo uma das melhores formas de demonstração de conceitos em acústica e uma maneira efetiva de avaliar soluções previstas para qualidade sonora de produtos bem como o desempenho de salas de audição crítica.

Por definição, auralização é o processo de representar de forma audível, através de modelagem física ou matemática, o campo sonoro de uma fonte em um espaço, de forma a simular a experiência auditiva em uma determinada posição no ambiente modelado.

O resultado da modelagem é um filtro biaural que pode ser aplicado ao sinal da fonte por meio da convolução. Este sinal deve ser obtido previamente em uma condição livre de reflexão, para não conter a influência do ambiente de gravação. O resultado da convolução é um sinal biaural que pode ser apresentado através de fones de ouvido ou via alto-falantes. Caso se opte por alto-falantes, é preciso cancelar a fala cruzada (*cross-talk*) entre os canais. Os fones de ouvido oferecem diversas vantagens, sendo a principal delas a separação total dos canais.

## **1.1. Objetivos do trabalho**

### **1.1.1. Gerais**

Apresentar os conceitos e ferramentas utilizadas no processo da auralização, bem como identificar as dificuldades e limitações de cada etapa envolvida.

### **1.1.2. Específicos**

Simular, através da auralização, fontes sonoras dentro de uma sala de geometria simples, utilizando três diferentes métodos: Traçado de Raios, Fontes Virtuais e Traçado de Pirâmides. Comparar os resultados desses métodos de auralização com gravações das mesmas fontes dentro do ambiente real, por meio de análise subjetiva e objetiva. As fontes sonoras utilizadas foram: um aparelho de ar-condicionado, a voz humana e o violão.

## **1.2. Conteúdo dos capítulos**

**CAPÍTULO 2** - são revisados os conceitos que compõem a base teórica do processo de auralização.

**CAPÍTULO 3** - são referenciados os atuais estados da literatura relacionada aos assuntos utilizados como fundamentos para esta dissertação de mestrado.

**CAPÍTULO 4** - são expostos os métodos utilizados para medir a direcionalidade de uma fonte sonora, no caso deste trabalho, um aparelho de ar-condicionado. Também são apresentados os diagramas de direcionalidade para dois outros tipos de fontes sonoras (voz e violão). Finalmente, é discutido o conceito dos modelos de direcionalidade incluído nos algoritmos de simulação.

**CAPÍTULO 5** - são discutidos os métodos utilizados para todas as gravações e reproduções realizadas ao longo do trabalho.

**CAPÍTULO 6** - são discutidos os métodos e programas utilizados na simulação dos elementos que compõem o sistema em estudo: fonte, meio e receptor. Também é apresentada a sala considerada em todas as simulações e as configurações fonte-receptor adotadas para as três distintas fontes sonoras consideradas.

**CAPÍTULO 7** - é dividido em duas partes. Inicialmente é apresentada a metodologia utilizada para a avaliação subjetiva dos resultados dos diferentes métodos de auralização para voz e violão. Depois são demonstrados os resultados das comparações objetivas relativas à auralização do ruído do aparelho de ar-condicionado. As últimas baseiam-se na análise espectral.

**CAPÍTULO 8** - são apresentadas as conclusões sobre os resultados do trabalho de forma geral. Também são feitas sugestões para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

### CONCEITOS BÁSICOS

Neste capítulo são revisados alguns conceitos que compõem a base teórica do processo de auralização.

#### 2.1. Campos sonoros

Um campo sonoro é uma zona do espaço onde existem ondas sonoras, sendo definido pela pressão sonora e pela velocidade das partículas [HENRIQUE, 2002]. São esses parâmetros e a relação de fase entre eles que descrevem o comportamento das ondas sonoras no tempo e no espaço. O termo campo sonoro descreve a interação das ondas sonoras com o meio ambiente. A sua natureza depende da radiação da fonte sonora, da distância à fonte e dos obstáculos no percurso das ondas.

Um campo livre é um campo sonoro em que as ondas sonoras se propagam em todas as direções sem obstáculos, não havendo reflexão, difração, refração ou difusão. Uma vez que não há obstáculos nem reflexões, é evidente que um campo sonoro livre não pode apresentar fenômenos de ressonância. Um ambiente que se possa considerar verdadeiramente um campo livre é praticamente impossível de obter, sendo a câmara anecóica<sup>1</sup> a melhor aproximação técnica, uma vez que quase não existe reflexão ou, dito de outro modo, a absorção sonora pelas superfícies internas do espaço é praticamente total. Também se usa a designação campo direto como sinônimo de campo livre, porque neste só existe som direto.

Num espaço fechado comum existe som direto e som reverberante. O som reverberante resulta das reflexões nas superfícies internas desse ambiente, gerando um campo denominado campo reverberante.

Num campo difuso existe a mesma pressão sonora média em todos os pontos e a radiação sonora faz-se de modo idêntico em todas as direções (campo difuso e campo reverberante são muitas vezes considerados sinônimos). Para ter um campo difuso relativo às frequências graves, uma sala deve ser bastante grande, pois as baixas frequências têm grande comprimento de onda. A frequência acima da qual existe campo difuso pode ser determinada através da equação desenvolvida por Schröder em 1965 [KUTTRUFF, 1991], como segue:

---

<sup>1</sup> Sala especialmente projetada para o teste de equipamentos sonoros, microfones e alto-falantes, em teoria absolutamente isenta de reverberações. Essa característica é obtida pelo uso de material acústico absorvente em forma de cunhas. Ver Figura 2.1.

$$f = 2000 \sqrt{\frac{T_{60}}{V}} \quad [\text{Hz}] \quad (2.1)$$

onde  $T_{60}$  é o tempo de reverberação (s) e  $V$  é o volume da sala ( $\text{m}^3$ ).

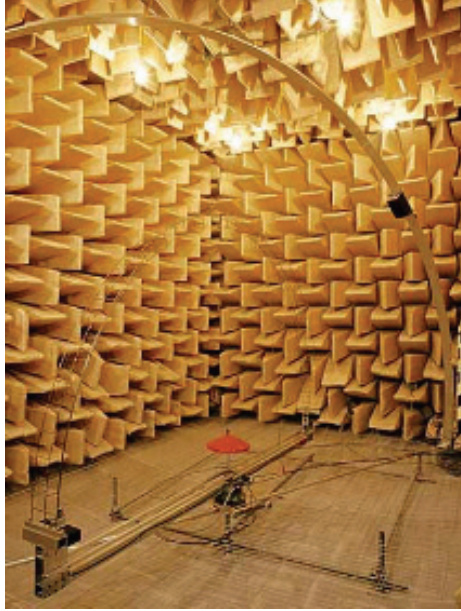


Figura 2.1 – Interior de uma câmara anecóica [SALFORD].

## 2.2. Equação da onda

As equações de onda que regem os fenômenos de propagação em acústica derivam das equações da mecânica dos fluidos. Como grande parte dos fenômenos acústicos envolve pequenas perturbações, é possível fazer simplificações que resultam em equações linearizadas, a partir das quais se deduz, para o campo de pressão, a equação da onda plana se propagando ao longo do eixo  $x$  [KUTTRUFF, 1991]:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.2)$$

onde  $p = p(x, t)$ .

A representação complexa da solução harmônica para a Equação (2.2) é dada por:



$$\mathbf{p} = \mathbf{A}e^{j(\omega t - kx)} + \mathbf{B}e^{j(\omega t + kx)} \quad (2.3)$$

onde  $k$  é o número de onda dado por  $\omega/c$ . As constantes complexas  $\mathbf{A}$  e  $\mathbf{B}$  são usadas para adaptar essa solução às condições de contorno.

Teoricamente uma resposta impulsiva entre uma fonte e um receptor pode ser obtida através da solução da equação de onda, porém o procedimento analítico exige um esforço considerável. Assim, outros métodos de modelagem são usados para evitar esta dificuldade (vide Capítulo 3, item 3.1).

### 2.3. Processamento digital de sinais

O processamento de sinais consiste na análise e/ou modificação de sinais de forma a extrair informações dos mesmos e/ou torná-los mais apropriados para alguma aplicação específica. Pode ser realizado de forma analógica ou digital. Existem diversas técnicas computacionais que podem ser utilizadas diretamente em um sistema baseado no IBM-PC padrão, sem a necessidade do uso de equipamentos de hardware específicos como os DSPs e microcontroladores. As transformadas matemáticas como a de Fourier e Wavelets são exemplos desse tipo de processamento.

Com o crescente avanço da tecnologia digital e da capacidade de processamento dos computadores, a manipulação dos sinais de áudio, por intermédio do processamento digital, se tornou corriqueira e até mesmo necessária às demandas atuais.

Quando se pretende implantar um sistema de auralização que possa ser utilizado em um computador pessoal, as teorias e técnicas de processamento de sinais discretos no tempo passam a orientar os resultados da acústica e da psicoacústica em direção à realização virtual de ambientes e eventos auditivos.

#### 2.3.1. Convolução

A convolução é uma das operações mais utilizadas no processamento digital de sinais. Um exemplo seria a implementação de um filtro digital, normalmente efetuada através da convolução direta do sinal de entrada com a resposta impulsiva do filtro. Ao estimar o conteúdo espectral de um sinal, a operação básica da autocorrelação é simplesmente a convolução do sinal com uma versão dele mesmo, porém invertida no tempo

[SOKOLNIHOFF e REDHEFFER, 1958]. Na auralização, o resultado é obtido através da convolução do filtro resultante da modelagem com um som gravado da fonte sonora.

Teoricamente, a transformada de Laplace do produto de convolução entre duas funções  $f$  e  $g$  é igual ao produto das transformadas de Laplace das duas funções.

Demonstrando matematicamente, a partir das definições da transformada de Laplace e do produto de convolução, obtém-se:

$$L\{f * g\} = \int_0^{\infty} \int_0^t f(r)g(t-r)e^{-st} dr dt \quad (2.4)$$

A integral em  $r$  pode ser estendida até infinito ao multiplicá-la por uma função degrau unitário que anule o trecho desde o tempo  $t$  até infinito:

$$L\{f * g\} = \int_0^{\infty} \int_0^t f(r)g(t-r)u(t-r)e^{-st} dr dt \quad (2.5)$$

Trocando a ordem dos dois operadores integrais, obtém-se:

$$L\{f * g\} = \int_0^{\infty} f(r) \left[ \int_0^t g(t-r)u(t-r)e^{-st} dt \right] dr \quad (2.6)$$

O termo entre colchetes é a transformada de Laplace da função  $g$ , deslocada em  $t$ :

$$g(t-r)u(t-r) \quad (2.7)$$

Pode-se observar que é igual à transformada de Laplace de  $g$ , multiplicada pela exponencial de  $-sr$ . Assim, se obtém o resultado:

$$L\{f * g\} = G(s) \int_0^{\infty} f(r)e^{-sr} dr \quad (2.8)$$

Esse resultado é igual ao produto das transformadas de Laplace das duas funções, como se pretendia demonstrar:

$$L\{f * g\} = F(s) G(s) \quad (2.9)$$

O teorema anterior também implica que a transformada inversa de Laplace de um produto de funções é igual ao produto de convolução entre as transformadas inversas das duas funções. O teorema de convolução é útil no cálculo de transformadas inversas de funções complicadas que possam ser escritas como o produto entre funções simples. O produto de convolução entre funções verifica a propriedade comutativa, associativa e distributiva em relação à soma de funções.

Vendo de outra forma, também se pode definir a convolução da seguinte forma: “A transformada de Fourier de duas funções convoluídas no domínio do tempo é igual ao produto das transformadas das duas funções no domínio de Fourier”.

A convolução de dois sinais retangulares está exemplificada na Figura 2.2.

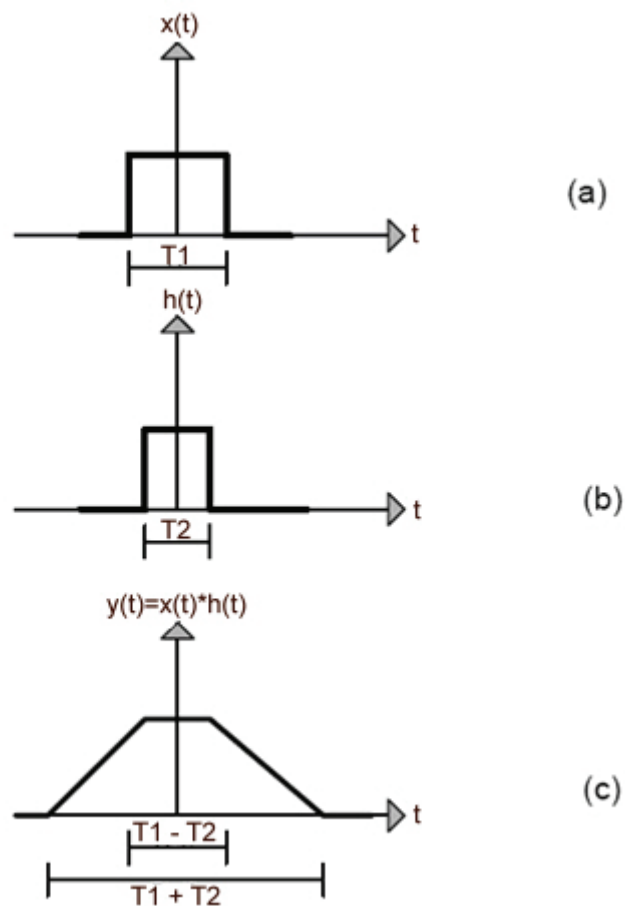


Figura 2.2 - Exemplo de convolução entre dois sinais retangulares (a) e (b), com duração  $T1$  e  $T2$ , gerando em (c) um sinal  $y(t)$ .

### 2.3.2. Convolução no domínio da frequência

Somente para sistemas lineares e invariantes no tempo (SLITs), abordados no item 2.3.3 deste capítulo, a operação de convolução no domínio do tempo equivale à multiplicação no domínio da frequência. Sendo assim é possível calcular a transformada de Fourier dos sinais, realizar a multiplicação entre elas e retornar ao domínio do tempo, através da transformada inversa de Fourier. Tal transformada pode ser implementada de duas formas. Uma delas é a forma tradicional de realizar a transformada rápida de Fourier, do inglês *fast Fourier transform*, FFT [OPPENHEIM e SCHAFER, 1999]. A outra maneira, chamada de FTTW [FRIGO e JOHNSON, 2005], consiste em uma biblioteca para linguagem C e representa uma forma bastante eficiente de implementação da transformada de Fourier.

### 2.3.3. Sistemas lineares e resposta impulsiva

Um sistema físico ideal é definido como um sistema fisicamente realizável, que apresenta estabilidade, linearidade e parâmetros de valor constante. Tais sistemas possuem propriedades importantes para uma análise linear, pois suas características podem ser identificadas experimentalmente a partir da relação entre sinais de estímulo (entradas) e de resposta (saídas) medidos sobre o sistema [SOKOLNIHOFF e REDHEFFER, 1958].

Considerando um sistema linear e invariante no tempo (SLIT), uma das soluções para a análise do sistema, a partir da equação diferencial que rege o seu comportamento, é a Transformada de Fourier, cuja função é mudar o domínio dos dados, do tempo para a frequência. É um recurso interessante, em virtude da manipulação matemática no domínio da frequência ser mais simples.

A Transformada de Fourier  $X(\omega)$  de um sinal  $x(t)$  é definida por:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2.10)$$

Para retornar ao domínio do tempo, utiliza-se a Transformada Inversa de Fourier, definida por:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2.11)$$

Somente é possível realizar a Transformada de Fourier de uma função  $f(x)$  sob a condição de existir o limite finito dado pela Equação (2.12) [KREYSZIG, 1993]:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |f(x)| dx \quad (2.12)$$

Cabe ressaltar que a utilidade da Transformada de Fourier é fundamentada no fato de que o sistema analisado é linear e invariante no tempo (SLIT), porque as exponenciais são autofunções dos operadores diferenciais lineares com coeficientes constantes.

Representam-se entrada e saída de sinais no domínio da frequência de um sistema linear e invariante no tempo (SLIT) por:

$$X(\omega) \Rightarrow \boxed{\text{SLIT}} \Rightarrow Y(\omega)$$

Conhecido o sinal de entrada  $x(t)$  e o sinal de saída  $y(t)$ , pode-se determinar a Função de Resposta em Frequência (FRF) do sistema,  $H(\omega)$ , a partir de:

$$\begin{aligned} Y(\omega) &= H(\omega) X(\omega) \\ H(\omega) &= \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Entretanto, para que a FRF represente a descrição completa das características do sistema, é necessário que o sinal de excitação possua todas as componentes de frequência. Idealmente, isso é obtido através da função Delta ou Delta de Dirac,  $\delta(t)$ , definida por:

$$\delta(t) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} f_{\varepsilon}(t) \quad (2.14)$$

onde:

$$f_{\varepsilon}(t) = \begin{cases} 0 & , \text{ para } |t| > \varepsilon \\ \frac{1}{2\varepsilon} & , \text{ para } t = 0 \end{cases}$$

A função Delta de Dirac possui as seguintes propriedades:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1 \quad (2.15)$$

$$\delta(t) = 0, \quad t \neq 0 \quad (2.16)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \delta(t-a) dt = f(a) \quad (2.17)$$

As características da função Delta de Dirac são que sua área é igual a 1, sua amplitude tende para infinito e seu tempo de duração para zero, e que em todas as frequências sua transformada tem amplitude igual a 1. A resposta  $h(t)$  de um sistema a uma excitação Delta é conhecida como Resposta Impulsiva e é representada pela Figura 2.3.

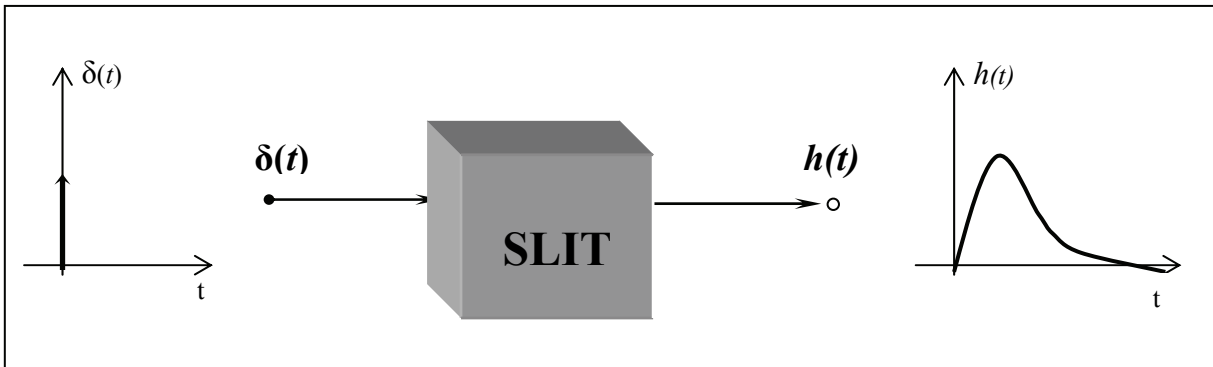


Figura 2.3 – Resposta Impulsiva aplicada a um Sistema Linear Invariante no Tempo.

Conhecida  $H(\omega)$ , pode-se calcular  $h(t)$  através da Transformada Inversa de Fourier. Feito isto, é possível utilizar a convolução para determinar a resposta para uma excitação qualquer. A convolução de dois sinais  $x(t)$  e  $y(t)$  é dada por:

$$y(t) = x(t) * h(t) = \int_0^{\infty} x(\tau) h(t-\tau) d\tau \quad \Rightarrow \quad Y(\omega) = H(\omega) X(\omega) \quad (2.18)$$

onde o sinal  $*$  indica a convolução dos sinais.

O limite inferior de integração é zero em razão da causalidade, dado que um sistema fisicamente realizável não pode produzir uma saída antes que um sinal seja aplicado em sua entrada. A estabilidade do sistema limita a saída a sinais finitos para todos sinais de entrada finitos.

O sistema será invariante no tempo se seus parâmetros tiverem valor constante. Assim, a resposta do sistema  $h(t)$  será constante para qualquer valor de tempo.

Dado que um sistema produza as saídas  $y_1(t)$  e  $y_2(t)$  para as entradas  $x_1(t)$  e  $x_2(t)$ , respectivamente, esse sistema será linear caso apresente as propriedades de aditividade e homogeneidade, ou seja, para a entrada  $c(x_1(t) + x_2(t))$  fornecer a resposta  $cy_1(t)$  e  $cy_2(t)$ , sendo  $c$  uma constante qualquer.

## 2.4. Tecnologia biaural

É desejável em medições que um sensor ou sistema de aquisição de dados não interfira no fenômeno a ser registrado. As orelhas, receptores acústicos no homem, ficam em lados opostos da cabeça. Isto certamente influi no fenômeno de percepção sonora. E tudo soa muito bem, tridimensional e preciso espacialmente. Os sinais assim modificados são chamados de sinais biaurais ou biauriculares. Nestes termos, o "bi" do latim, significa dois ou duas vezes.

A técnica de gravação biaural usa dois microfones da mesma forma que em uma gravação estéreo convencional, porém são posicionados dentro das orelhas, separados por aproximadamente quinze centímetros em direções opostas, apontando ao longo do eixo invisível que transpassa a cabeça.

O termo tecnologia biaural se refere ao conjunto de técnicas de gravação e reprodução das pressões sonoras que ocorrem nos tímpanos para tentar ao máximo recriar um evento auditivo sem que haja diferenças de localização espacial e timbre entre o que foi gravado e o que será reproduzido. Esses sinais, que são coletados nas membranas timpânicas, e que possuem todas as informações espaciais e espectrais de uma imagem sonora, são denominados de sinais biaurais [FERNANDES JÚNIOR, 2005].

As transformações que ocorrem em um sinal de uma fonte sonora podem ser mais bem representadas e analisadas pelo par de respostas impulsivas relacionadas à cabeça (*Head Related Impulse Responses - HRIR*). Os respectivos espectros dessas respostas impulsivas são denominados Funções de Transferência Relacionadas à Cabeça (*Head Related Transfer Functions - HRTF*) [BLAUERT, 1997].

### 2.4.1. Funções de transferência relacionadas à cabeça – HRTFs

Considere uma fonte sonora que proporciona uma pressão acústica, medida num ponto de referência, identificada por  $p_I(t)$ . Se um ouvinte passa a ocupar um lugar nesse espaço de tal forma que o centro do eixo imaginário que transpassa a cabeça através das duas orelhas (origem do sistema referencial) seja o ponto onde foi tomada a pressão  $p_I(t)$ , pode-se escrever as seguintes funções de transferência de campo livre através das Equações (2.19), (2.20) e (2.21):

$$\frac{P_4(\omega)}{P_1(\omega)} = \frac{\text{pressão sonora no tímpano}}{\text{pressão sonora no centro da cabeça com o ouvinte ausente}} \quad (2.19)$$

$$\frac{P_3(\omega)}{P_1(\omega)} = \frac{\text{pressão sonora na entrada do canal auditivo}}{\text{pressão sonora no centro da cabeça com o ouvinte ausente}} \quad (2.20)$$

$$\frac{P_2(\omega)}{P_1(\omega)} = \frac{\text{pressão sonora na entrada do canal bloqueado}}{\text{pressão sonora no centro da cabeça com o ouvinte ausente}} \quad (2.21)$$

Essas funções de transferência dependem do ângulo de incidência (Figura 2.4) e da distância até a fonte sonora.

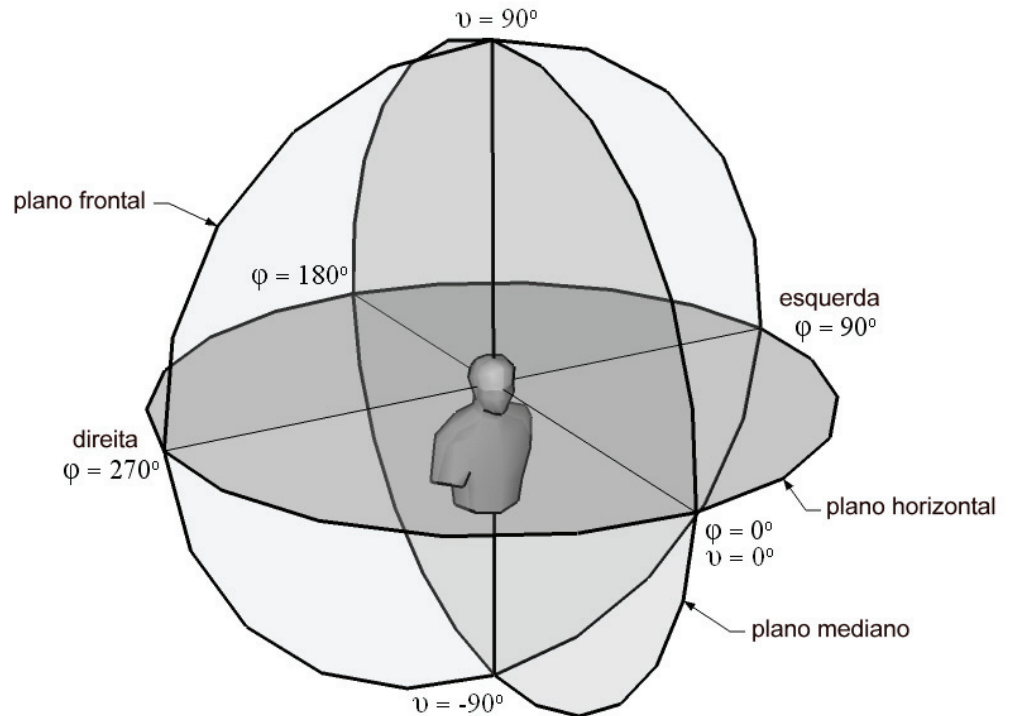


Figura 2.4 – Sistema de coordenadas polares.



Jens Blauert (1997) indica que se a distância até a fonte sonora for maior que 3m a onda incidente já pode ser considerada como plana e que, assim, as *HRTF* anteriores tornam-se quase independentes da distância da fonte.

Nas *HRTFs*, é de extrema importância a relação entre direção de incidência e a variação destas funções de transferência, representadas pelas Equações (2.19), (2.20) e (2.21), para diferentes pontos de coleta no canal auditivo. A partir da entrada do conduto, a propagação sonora passa a ser unidimensional. Isto quer dizer que ela se torna independente da direção e da distância da fonte sonora [BLAUERT, 1997][MØLLER, 1992], considerando que a fonte não é uma fonte próxima.

A maior variação das *HRTFs* se dá a partir de 200Hz. A cabeça, o torso e os ombros começam a interferir de maneira significativa nas frequências médias (até aproximadamente 1,5 kHz) e o pavilhão auricular, em conjunto com a *cavum conchae*, distorcem as frequências mais altas (a partir de aproximadamente 2 kHz) [PAUL, 2008].

Dependendo da pessoa em que se fazem as medições, as diferenças entre as *HRTFs* podem ser consideráveis, como mostra a Figura 2.5, onde *P1*, *P2*, *P3* e *P4* representam as curvas de *HRTF* de diferentes pessoas. Esse fato pode trazer alguns problemas quando se realizam gravações através de manequins para fazer posteriormente a reprodução para um ouvinte, ou mesmo gravações utilizando o canal auditivo de outras pessoas. O resultado perde precisão em localização espacial e realismo, quando escutado por outra pessoa.

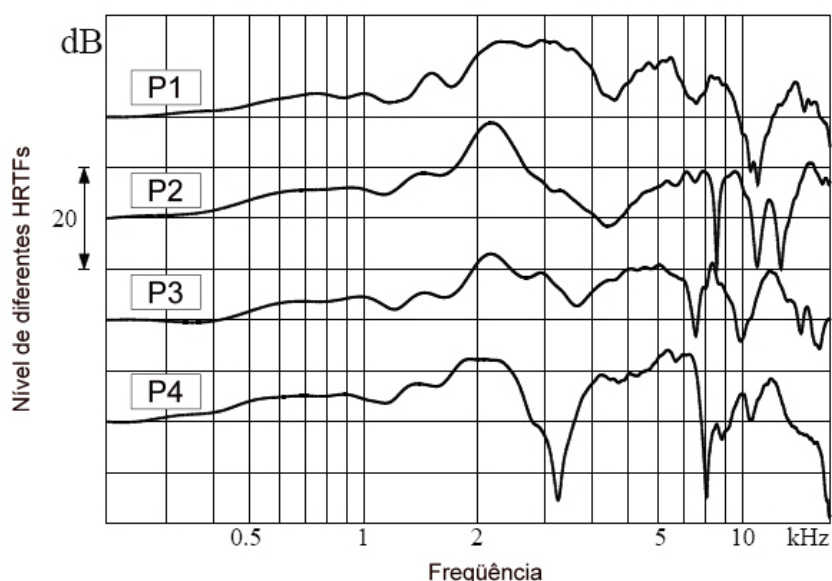


Figura 2.5 – *HRTFs* medidas para diferentes pessoas [VORLÄNDER, 2005].

Existem algumas bases de dados de *HRTFs* publicadas, disponibilizadas em páginas na internet [KEMAR][IRCAM][AUDIS][CIPIC].

#### **2.4.2. Técnicas de gravação**

A gravação binaural pode ser realizada através do sistema que utiliza pessoas ou por outro que trabalha com modelos parciais de pessoas, os manequins [PAUL, 2008]. O método utilizado nesse estudo foi o manequim, ilustrado na Figura 2.6. Os manequins são imitações parciais do sistema auditivo e de algumas outras partes do ser humano que têm influência no som. O som é captado por dois microfones posicionados dentro de modelos de ouvidos.



Figura 2.6 – Manequim (*dummy head*) instrumentado com microfones nos ouvidos.

#### **2.4.3. Reprodução via fones de ouvido**

O objetivo final da auralização é a reprodução, principalmente via fones de ouvido, devido à sua flexibilidade de uso em relação aos ambientes e à destinação dos sinais pertinentes a cada orelha. Os fones de ouvido oferecem diversas vantagens tais como a separação total dos canais. É necessária uma equalização referente à cadeia de dispositivos percorrida pelo áudio binaural, a fim de tirar as distorções lineares introduzidas, principalmente pelos fones, permitindo uma reprodução mais fiel dos sinais. Assim, é possível recriar a impressão sonora que um ouvinte experimentaria se estivesse em situação real (audição direta). O processo de audição direta de um sinal por um ouvinte e a audição do mesmo sinal gravado com um manequim e reproduzido via fones de ouvido após a equalização é ilustrado pela Figura 2.7. Essa equalização só é possível de ser aplicada ao sinal após o levantamento da função de transferência do fone de ouvido [FONSECA *et al.*, 2006].

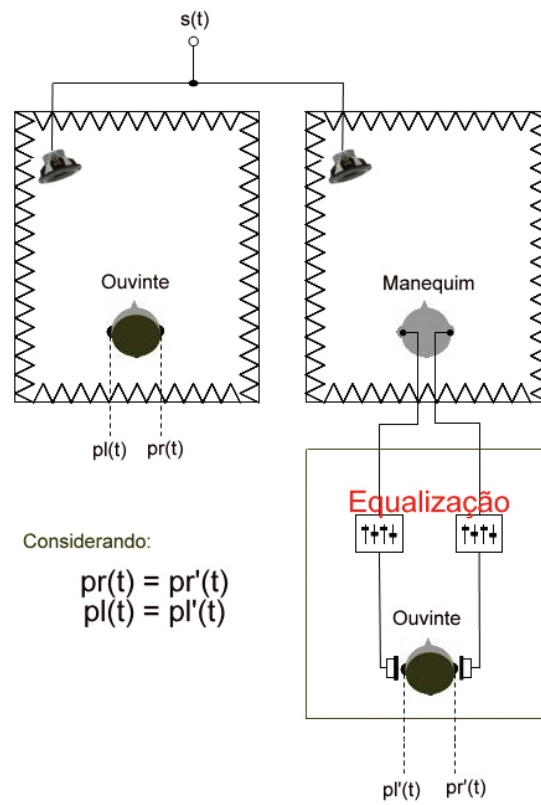


Figura 2.7 – Comparação da audição direta *versus* a cadeia de gravação e reprodução.

## CAPÍTULO 3

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são referenciados os atuais estados da literatura relacionada aos assuntos utilizados como fundamentos para esta dissertação de mestrado.

#### 3.1. Auralização

Não é novidade a idéia de fazer com que seja possível ouvir uma fonte sonora, em campo livre ou em um ambiente fechado, antes mesmo de sua construção [ALLEN e BERKLEY, 1979][LEHNERT e BLAUERT, 1989][KULOWSKI, 1985]. No entanto, ainda hoje, muitos técnicos que lidam com acústica precisam terminar as obras ou reformas nas salas para poder conhecer o resultado do projeto acústico. Modelos em escala têm sido pouco utilizados, por serem complexos, caros e pouco precisos.

Por definição, auralização é o processo de “renderizar” de forma audível, através de modelagem física ou matemática, o campo sonoro de uma fonte em um espaço, de forma a simular a experiência auditiva em uma determinada posição no espaço modelado [KUTTRUFF, 1993]. Atualmente, o crescente avanço na capacidade de processamento nos computadores tem dado aos acústicos uma poderosa ferramenta de simulação de projetos de salas de audição crítica, mas, também, aplicável a outros projetos, tais como isolamento contra ruído, por exemplo.

A simulação da resposta impulsiva do ambiente pode ser feita através de métodos geométricos, que são baseados na acústica geométrica [FARIA, 2005]. Os programas de simulação se utilizam desses métodos para simular o comportamento acústico de um ambiente fechado.

De posse da resposta impulsiva da sala, considerando as possíveis angulações de incidência do som sobre o receptor, é realizado o processamento da resposta impulsiva binaural do campo acústico para uma determinada posição e orientação do ouvinte. O resultado dessa modelagem é um filtro ao qual pode ser aplicado um sinal anecóico (gravado em câmara anecóica), por meio da convolução. Neste trabalho, este sinal anecóico foi previamente gravado usando-se a fonte em estudo como referência. O resultado final pode ser apresentado através de fones de ouvido ou via alto-falantes (com o devido processamento, para cancelar o sinal repetido no ouvido oposto). O esquema apresentado na Figura 3.1 ilustra de maneira resumida as etapas da auralização.

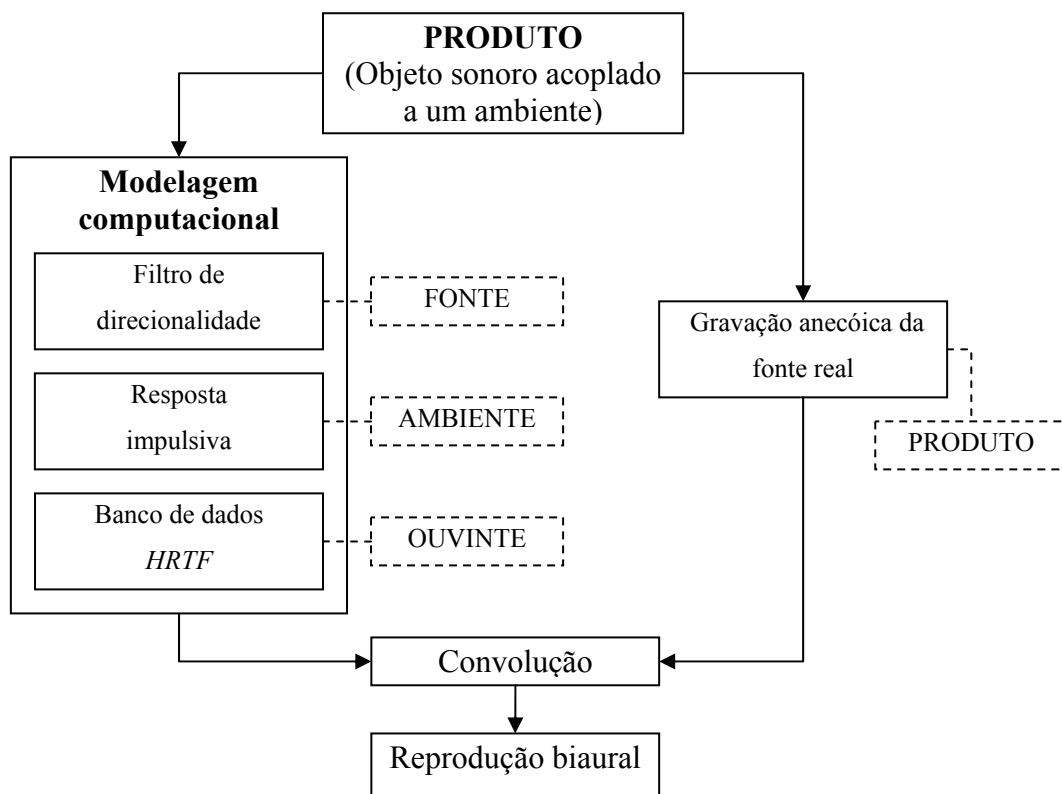


Figura 3.1 – Simplificação da cadeia de processamento do sinal na auralização.

### 3.1.1. Modelagem do meio de propagação sonora

A modelagem do meio é feita, na realidade, através da modelagem da propagação do som no ar e de suas interações com as superfícies (teto, piso, paredes e objetos internos que tenham dimensões relevantes em comparação com os comprimentos de onda do campo sonoro). Considerando uma posição fixa para a fonte e o receptor, se a temperatura e a umidade relativa do ar se mantiverem constantes e se não houver correntes de ar, pode-se considerar o campo acústico de um ambiente como sendo um sistema linear invariante no tempo (SLIT), e sua caracterização pode ser feita através de sua resposta impulsiva [XIANG e BLAUERT, 1993]. Essa função pode ser obtida por meio de algoritmos usados para a determinação do histórico de todas as reflexões da fonte até o ouvinte. Matematicamente, a propagação sonora pode ser descrita pela equação de onda ou equação de Helmholtz [KINSLER *et al.*, 1982]. É possível obter teoricamente uma resposta impulsiva entre uma fonte e um receptor por intermédio da solução da equação de onda, mas, analiticamente, já seria muito trabalhoso, mesmo para um caso simples. Assim, outros métodos de modelagem são usados para agilizar o procedimento. Este trabalho utilizou os métodos geométricos de simulação.

Os métodos geométricos, baseados na acústica geométrica, são: o método do Traçado de Raios, o método das Imagens Virtuais da Fonte e o método do Traçado de Pirâmides.

### 3.1.2. O Método das Fontes Virtuais (FV)

Pode-se descrever o Método das Fontes Virtuais (FV) através de uma simples analogia com um problema óptico, onde consideram-se todas as paredes de uma sala como sendo espelhos [ALLEN e BERKLEY, 1979]. É possível encontrar as posições das imagens da fonte, com relação a cada parede, através de relações geométricas. Sendo assim, um observador pode ver, além de imagens refletidas da fonte, outras geradas pela nova reflexão das imagens refletidas, em relação ao prolongamento das superfícies reais. As segundas são denominadas imagens de primeira ordem e as demais são imagens de ordens superiores (segunda, terceira e assim por diante).

O espelhamento de fontes virtuais é feito com o objetivo de rastrear os caminhos de reflexão do som da fonte sonora até o receptor [GOMES, 2007]. Esse conceito pode ser demonstrado facilmente por uma figura bidimensional de um problema que trata de uma sala retangular. Esta contém uma fonte sonora esférica (omnidirecional) e um receptor (ouvinte), como mostra a Figura 3.2.

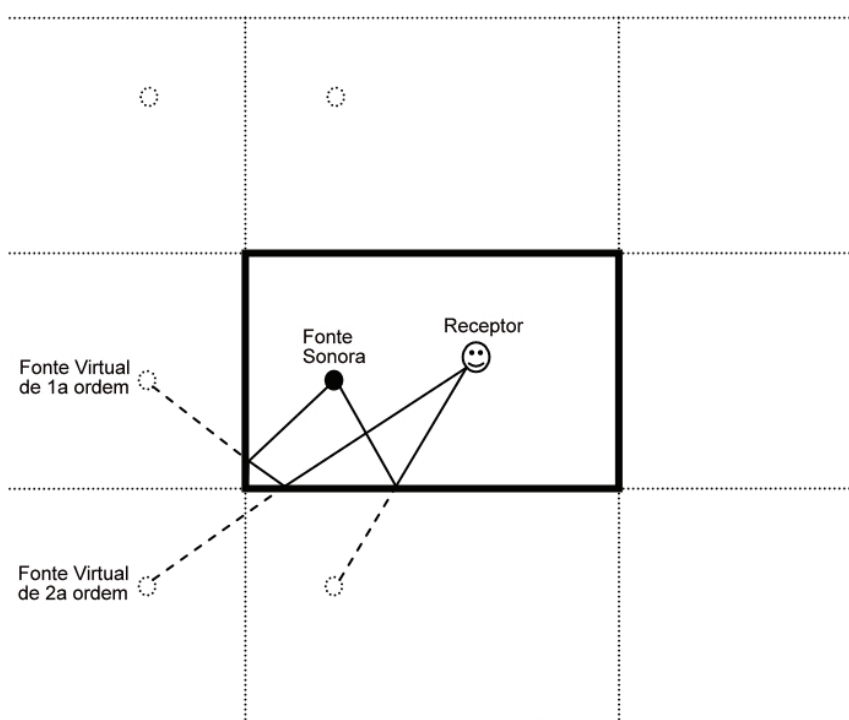


Figura 3.2 - Ilustração simplificada do princípio do Método de Fontes Virtuais.

Inicia-se construindo as imagens espelhadas de primeira ordem da fonte sonora em relação a todas as paredes. Pelo cálculo dos pontos de interseção do raio emitido pela fonte com cada parede, é possível projetar os caminhos de reflexão de primeira ordem. Da mesma forma procede-se para encontrar os caminhos das reflexões de segunda ordem, eliminando a

parede em que a fonte secundária foi espelhada por último. Esse procedimento continua até certa ordem predeterminada de fontes virtuais. O método pode ser aplicado para a avaliação de regime permanente, quando se quer avaliar o nível de pressão sonora [BALLESTEROS, 1991], ou transitório, quando se quer avaliar a resposta impulsiva [GIBBS e JONES, 1972], que é o caso estudado neste trabalho.

Em salas de geometria regular não há necessidade de se realizar testes de visibilidade. O exemplo ilustrado na Figura 3.3 mostra que o receptor R1 pode ser alcançado pela reflexão de primeira ordem sobre a parede 1, enquanto o receptor R2 não consegue. Em outras palavras, R1 é visível por S1 enquanto R2 não é. Isso significa que para todos os pontos de interseção calculados, deve-se checar se estão dentro dos limites físicos reais. Para o caso do teste de visibilidade, utiliza-se o algoritmo descrito em BORISH (1984).

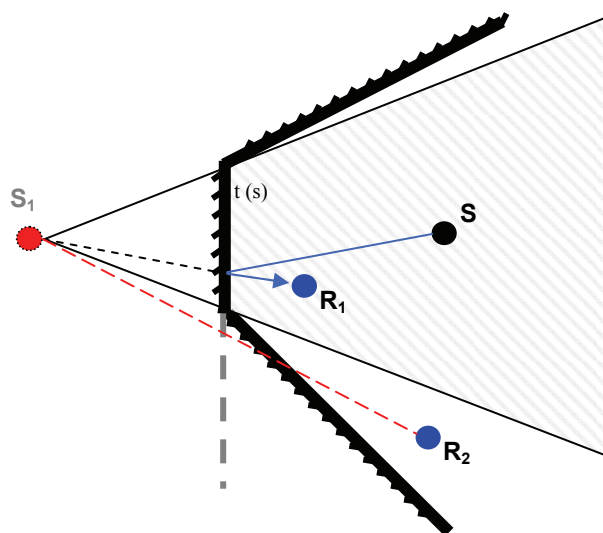


Figura 3.3 – Teste de visibilidade para Fontes Virtuais.

Devido aos testes de visibilidade, o Método de Fontes Virtuais demanda um tempo computacional bastante longo, especialmente quando o problema envolve uma grande quantidade de superfícies ou quando a absorção sonora média das superfícies é baixa, pois aumenta consideravelmente o número de fontes virtuais a serem consideradas. Há um procedimento para acelerar o processo [VORLÄNDER, 1989], no qual consiste em pré-determinar as fontes virtuais visíveis a partir da aplicação do Método do Traçado de Raios. Para isso, o que se deve fazer é armazenar em uma lista os índices das superfícies refletoras na história de um raio que atinge o receptor.

O módulo independente de Fontes Virtuais utilizado neste trabalho realiza o teste de visibilidade tradicional.

### 3.1.3. Método de Traçado de Raios (TR)

No Método de Traçado de Raios assume-se que a energia emitida pela fonte sonora é distribuída em um número discreto de raios sonoros. Cada raio tem energia inicial igual à energia total da fonte dividida pelo número de raios. O raio se propaga pela sala à velocidade do som e incide sobre as superfícies (paredes, piso, teto e elementos internos), refletindo-se conforme a lei da reflexão especular, conforme ilustra a Figura 3.4. O nível de energia de cada raio decai a cada reflexão por meio da absorção sonora das superfícies e vai perdendo progressivamente, também, energia pela absorção no ar. Quando o nível de energia chega ao limite definido pelo usuário, o raio é abandonado e o próximo é traçado [KULOWSKI, 1985].

Para calcular a energia sonora que chega em diferentes pontos de uma sala, são definidas células receptoras com volumes finitos. Cada raio acústico é checado para verificar se atingiu o receptor. O número de raios que atravessa o volume do receptor bem como a contribuição de energia desses raios fornece uma medida do nível de pressão sonora na região.

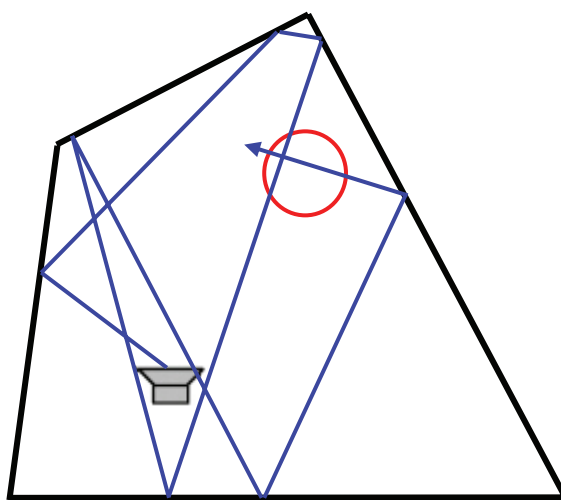


Figura 3.4 – Ilustração em 2D do traçado de um raio.

Quando é necessário registrar ecogramas<sup>2</sup>, deve-se proceder como descrito a seguir. A contribuição energética de cada um dos vários raios em certo receptor é adicionada dentro de intervalos de tempo prescritos, resultando em um histograma. Contudo, por causa do efeito da média temporal e do forte caráter aleatório dos tempos de chegada dos raios, o histograma será apenas uma representação aproximada do real.

---

<sup>2</sup> Um ecograma representa as amplitudes de energia sonora das sucessivas frentes de onda que partem da fonte sonora e chegam a um determinado receptor, como uma função do tempo.



O algoritmo para o método de Traçado de Raios é baseado em operações com vetores. Para a rotina principal do programa deve-se conhecer:

- os vértices das superfícies,
- os vetores normais aos planos que descrevem a geometria da sala,
- as coordenadas que indicam a posição da fonte sonora,
- as coordenadas que indicam a posição do receptor,
- o vetor que indica a direção inicial de propagação de cada raio;
- os coeficientes de absorção sonora e de espalhamento das superfícies modeladas.

#### 3.1.4. Método Híbrido ou Método de Traçado de Pirâmides (RN)

No Método de Traçado de Pirâmides, ao invés de raios, como no Método de Traçado de Raios, são usados feixes no formato de pirâmides para representar a onda acústica [FUNKHOUSER *et al.*, 1998][LEWERS, 1993], como ilustram as Figuras 3.5 e 3.6.

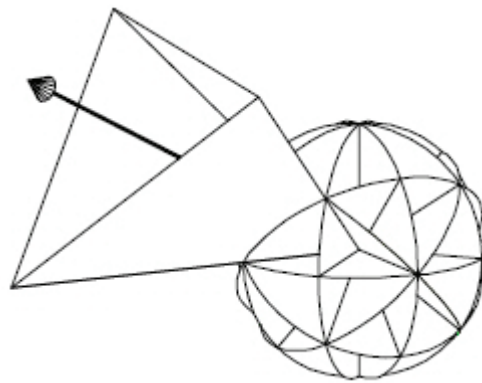


Figura 3.5 – Fonte sonora emitindo um feixe piramidal [FARINA, 1995].

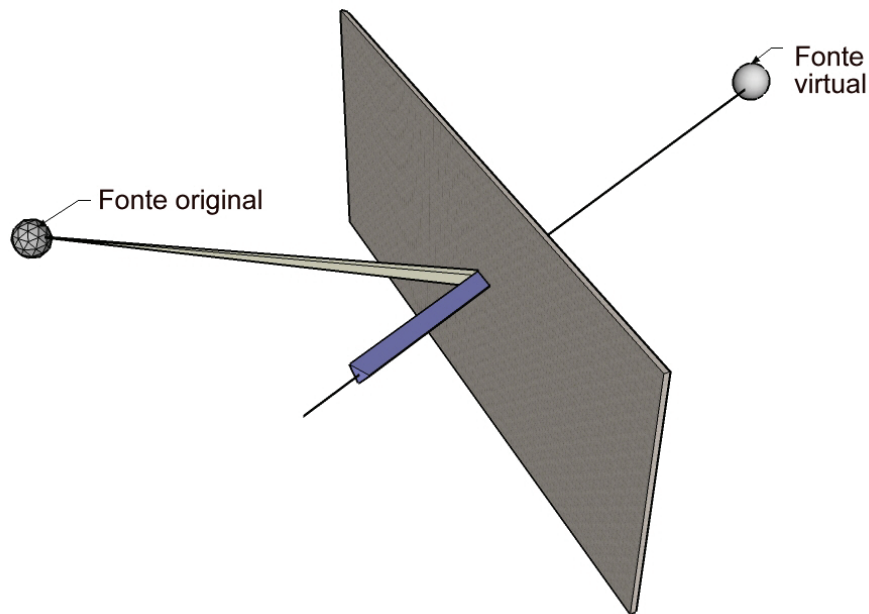


Figura 3.6 – Traçado de Pirâmides: fonte original espelhada na superfície, resultando na imagem que representa o ápice da pirâmide refletida.

Cada feixe, ao encontrar uma superfície interna da sala, cria uma interseção, a partir da qual haverá uma reflexão, representada por uma pirâmide, cujo ápice é dado pelo espelhamento do ápice do feixe original sobre a superfície. A base triangular de cada feixe, usada para discretizar a frente de onda, ilustrada pela Figura 3.7, traz a vantagem de não causar sobreposição nas bordas e de cobrir todo o espaço de direções a partir da fonte sonora. Para que um feixe seja detectado pelo receptor, basta que o detector pontual esteja entre os planos que definem a pirâmide.

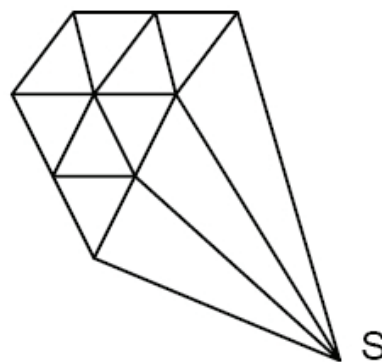


Figura 3.7 – Discretização da frente de onda através das bases triangulares das pirâmides.

O método possui uma vantagem sobre o Método das Fontes Virtuais, pois como cada região do espaço coberta por um feixe representa todos os pontos para os quais uma imagem da fonte está visível, as fontes virtuais de ordens mais elevadas só serão consideradas para os

polígonos que são interceptados pelo feixe. Isso reduz forma significativa o número de fontes virtuais a serem consideradas.

O Método de Traçado de Pirâmides pode ser considerado um Método Híbrido, por combinar alguns conceitos vantajosos dos dois métodos citados anteriormente em um só algoritmo. O programa RAYNOISE se baseia no Método de Traçado de Pirâmides e no Método de Traçado de Cones para simular o comportamento acústico de um ambiente fechado. Para mais detalhes, consultar RAYNOISE *User Manual*. Somente foi utilizado neste trabalho, dentro do programa RAYNOISE, o Método de Traçado de Pirâmides.

É importante diferenciar a utilização do termo “híbrido”, pois há autores que têm utilizado esse termo para denominar uma outra forma de combinação do Método do Traçado de Raios com o Método das Fontes Virtuais. Nesses casos, o Método do Traçado de Raios é usado para pré-selecionar fontes virtuais “audíveis” e acelerar a simulação feita através do Método das Fontes Virtuais; calcular o trecho final da resposta impulsiva e calcular o trecho inicial desta, referente às reflexões que ocorrem de forma difusa. O Método das Fontes Virtuais é então usado somente para calcular o trecho inicial da Resposta Impulsiva, por ser mais preciso na determinação da distribuição das primeiras reflexões. Existem outras formas de implementação de métodos geométricos [TENENBAUM *et al.*, 2006][MEDRADO e TENENBAUM, 2002][ALARCÃO, 2005].

### **3.1.5. Obtenção da resposta impulsiva biaural e apresentação do resultado**

De posse da resposta impulsiva da sala, considerando as possíveis angulações de incidência do som sobre o receptor, são escolhidas, de um banco de dados, as funções de transferência relacionadas à cabeça (*HRTFs*) para determinar a resposta impulsiva biaural. Esse resultado refere-se a somente uma determinada posição e orientação do ouvinte.

O resultado dessa modelagem é um filtro biaural que pode ser aplicado ao sinal anecóico da fonte por meio da convolução. Esse sinal deve ser obtido previamente em uma condição livre de reflexão, para não conter a influência do ambiente de gravação. O resultado da convolução é um conjunto de sinais baurais que pode ser apresentado através de fones de ouvido ou via alto-falantes. Caso se opte por alto-falantes, é preciso cancelar a fala cruzada (*cross-talk*) entre os canais, conforme ilustra a Figura 3.8, para evitar que o sinal destinado ao ouvido esquerdo chegue ao ouvido direito e vice-versa. Os fones de ouvido oferecem diversas vantagens tais como a separação total dos canais. É necessária a equalização referente à cadeia de dispositivos percorrida pelo sinal de áudio, tanto para fones de ouvido como para alto-falantes.

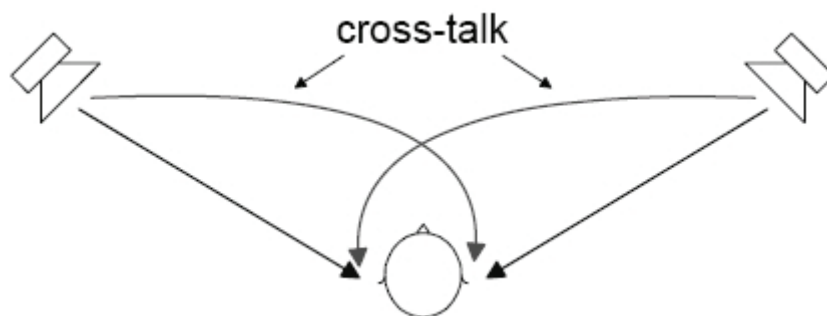


Figura 3.8 – Fala cruzada (*cross-talk*) decorrente da reprodução via alto-falantes.

## 3.2. Caracterização de Fontes Sonoras

### 3.2.1. Geração Sonora

A geração de um sinal digital de áudio pode ser feita por gravação ou através de síntese. No primeiro caso o sinal deve ser gravado em condições anecóicas, para que possa ser adicionado a ele posteriormente as respectivas reflexões. O sinal gravado precisa apresentar uma alta relação sinal-ruído (SNR – *signal-to-noise ratio*) a fim de evitar resultados indesejáveis no ambiente virtual. Também deve ser gravado como um sinal mono, pois as fontes sonoras são normalmente tratadas como fontes pontuais em relação ao modelo do ambiente. Contudo, ao invés de gravado, o sinal da fonte pode ser sintetizado. O modelo físico da fonte sonora é uma aproximação que permite ajustar os parâmetros de uma forma fisicamente previsível [SMITH, 1996]. Quando comparado a um som gravado, o sintetizado demanda menos dados a serem manipulados, mas ao custo de um aumento significativo no processamento computacional.

### 3.2.2. Direcionalidade

A maioria das fontes sonoras não radia igualmente em todas as direções, nem apresenta as características de monopolos. O seu comportamento é direcional por diversas razões: forma e tamanho da fonte sonora; impedância de radiação; modos vibratórios da superfície do radiador; reação do meio fluido na superfície do radiador [HENRIQUE, 2002].

A caracterização dos radiadores complexos é efetuada experimentalmente, medindo a pressão sonora a uma distância fixa da fonte sonora. Efetuando-se as medições em várias direções, obtém-se um traçado denominado diagrama de direcionalidade da fonte.

Freqüentemente a direcionalidade das fontes sonoras varia com a frequência, pelo que se deverá traçar diferentes diagramas para frequências típicas.

A direcionalidade das fontes é, também, caracterizada pelo fator de direcionalidade, representado pela Equação (2.21), ou pelo índice de direcionalidade, representado pela Equação (2.23). O fator de direcionalidade representa a relação entre a intensidade sonora à distância  $r$  na direção de uma fonte e a intensidade sonora média em todas as direções. A expressão do fator de direcionalidade,  $Q$ , é dada por:

$$Q = \frac{I}{I_{re}} \quad (2.21)$$

onde  $I$  é a intensidade medida a determinada distância da fonte, na direção em que a direcionalidade é especificada [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ] e  $I_{re}$  é a intensidade de referência, correspondente à emissão em campo livre, representado pela Equação 2.22.

$$I_{re} = \frac{P}{4\pi r^2} \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (2.22)$$

O índice de direcionalidade é dado por:

$$D_i = 10 \log \left( \frac{I}{I_{re}} \right) \quad [\text{dB}] \quad (2.23)$$

### 3.2.3. Modelos de direcionalidade em programas de simulação

Os modelos de direcionalidade podem ser implementados através de duas aproximações: filtragem direcional e um conjunto de fontes elementares. Podem ser usados modelos de direcionalidade para voz humana [HUOPANIEMI, KETTUNEN e RAHKONEN, 1999] ou para instrumentos musicais ou alto-falantes [MEYER, 1978]. Quando o padrão de radiação de uma fonte sonora não é satisfatório para uma aproximação de fonte pontual como é, por exemplo, o caso de um clarinete, podem ser usadas várias fontes pontuais simultaneamente. Se os filtros para a auralização serão usados em aplicações em tempo-real, algumas simplificações devem ser consideradas [HUOPANIEMI *et al.*, 1994].

Fundamentado nas propriedades físicas do ambiente, a distribuição espacial de fontes espelhadas é computada na etapa de modelagem do campo acústico. O próximo passo consiste na distribuição de fontes pontuais, baseado no conceito de fontes sonoras virtuais [KUTTRUFF, 1993]. Além do som direto, uma gama de reflexões chegará ao ouvinte devido à presença de superfícies refletoras; estas reflexões vêm de direções diferentes, com tempos de chegada e formas espectrais diferentes. O campo sonoro proveniente das superfícies refletoras é considerado em termos de uma "nuvem" de fontes sonoras virtuais que cercam o receptor na ausência de qualquer superfície. Para obter o sinal da fonte virtual, a cada fonte pontual é associado um filtro linear - isso modela o efeito da propagação média e das superfícies refletoras, como também a influência da direcionalidade da fonte primária [KORTCHMAR, 2000].

### 3.3. Parâmetros de comparação

A qualidade dos resultados de cada um dos métodos de auralização foi medida por meio de um procedimento de avaliação subjetiva. A técnica escolhida foi a comparação dos resultados da auralização com a gravação binaural de referência, utilizando como instrumento psicométrico uma escala em linha conforme proposto por LEITE e PAUL (2006).

O participante, após escutar a referência e cada som gerado por um dos três métodos, deveria posicionar na escala os sons em relação à referência. De uma lista maior de parâmetros foram escolhidos três, de mais fácil compreensão para sujeitos leigos, a saber:

- **Timbre** - definido pela Associação Americana de Normas (ASA) em 1960, como “atributo da sensação auditiva pelo qual um ouvinte pode julgar que dois sons apresentados de forma semelhante apresentam diferenças, tendo o mesmo *loudness*<sup>3</sup>”. É a qualidade dada a um som pelas nuances que fazem, por exemplo, uma voz distinguir-se de outra. O Timbre descreve, entre outras coisas, o equilíbrio entre as frequências baixas, médias e altas, mas se apresenta bastante difícil de descrever em termos subjetivos.
- **Localização** – regra pela qual a posição de um evento audível é relacionada a um atributo específico de um evento sonoro. Isso leva à pergunta: de onde exatamente um determinado som parece vir [BLAUERT, 1997]. A habilidade de localizar subjetivamente uma fonte

---

<sup>3</sup> *Loudness* – não é simplesmente intensidade sonora. Trata-se de um termo subjetivo que descreve a capacidade da percepção do ouvido humano e correlaciona-se com o volume sonoro percebido [LEITE e PAUL, 2006].

sonora é uma tarefa complexa que pode depender da direção, largura e distância aparente da fonte e das características de reverberação do ambiente em que o ouvinte está inserido, mas também do tipo de som que a fonte emite.

- **Reverberação** - O tempo de reverberação é definido como o tempo necessário para que o nível de energia sonora decaia de 60dB (1/1000) após ter sido interrompida a fonte sonora [ISO 3382, 1997]. Na prática, parte da sensação acústica de espaço que um ouvinte experimenta numa sala é resultado da reverberação e é essa sensação que acaba sendo avaliada pelo ouvinte. Sabine<sup>4</sup> determinou empiricamente a relação entre o tempo de reverberação ( $T_{60}$ ), volume e a área de absorção da sala.

$$T_{60} = \frac{0,161 V}{\sum A} \quad (2.24)$$

onde:

$V$  = volume da sala ( $m^3$ )

$A = S \alpha$

$S$  = área de superfície ( $m^2$ )

$\alpha$  = coeficiente de absorção do material em uma dada frequência

---

<sup>4</sup> Há cerca de um século, a avaliação acústica de ambientes era apoiada somente em conceitos subjetivos determinados quase sempre por músicos. Até que Wallace C. Sabine, pioneiro no estudo formal da acústica de salas, inicia suas pesquisas a partir de um ponto de vista físico e objetivo, levantando características construtivas da própria sala relacionadas ao complexo sonoro formado nela. A partir daí iniciou-se a busca por parâmetros objetivos efetivamente importantes para caracterizar a acústica de uma sala.

## **CAPÍTULO 4**

### **CARACTERIZAÇÃO DE FONTES SONORAS**

Neste capítulo são expostos os métodos utilizados para medir a direcionalidade de uma fonte sonora, no caso deste trabalho, um aparelho de ar-condicionado. Também são apresentados os diagramas de direcionalidade para dois outros tipos de fontes sonoras, voz e violão. Finalmente, é discutido o conceito dos modelos de direcionalidade incluído nos algoritmos de simulação.

#### **4.1. Caracterização da fonte**

A modelagem da fonte sonora e sua aplicação na auralização implicam em dois desafios: a gravação anecóica do som e a modelagem da fonte sonora na simulação acústica do ambiente.

Normalmente as gravações anecóicas são feitas com um único microfone, posicionando-o à frente da fonte. O controle da distância do microfone também requer bastante cuidado. A maioria das fontes naturais contém componentes sonoras de campo próximo. Logo uma gravação com um microfone muito próximo soará antinatural quando usado para auralização de uma distância um pouco maior da fonte.

Para a determinação da direcionalidade, uma maneira de se captar o som radiado pela fonte em direções diferentes é realizar medições ao redor e sobre a fonte com microfones em posições diferentes, registrando a informação espacial da radiação da fonte para diferentes bandas. Assim, ficarão determinadas assimetrias e mudanças na radiação para diferentes bandas de frequência. Nesse trabalho, foi utilizada a resolução em bandas de oitava, porque um dos programas utilizados para os casos de simulação, referentes ao Método de Traçado de Pirâmides (RAYNOISE), somente permitem a entrada de dados com esta resolução, considerando as bandas de 125 a 8000 Hz.

Já se encontravam disponíveis dados sobre a direcionalidade de duas das três fontes sonoras estudadas: violão e a voz humana [PTB]. No entanto, era necessário caracterizar a direcionalidade do aparelho condicionador de ar.

Foi preparado então um esquema para a medição das características direcionais da radiação sonora do aparelho condicionador de ar, utilizando 145 posições de microfone, distribuídas em uma semi-esfera formada pela revolução de um arco. Os sinais gravados



foram filtrados em bandas de oitava de 125 a 8000 Hz. Finalmente, foi calculada a direcionalidade média para cada banda de oitava.

As medições de direcionalidade e gravações anecóicas foram realizadas na câmara semi-anecóica do Laboratório de Vibrações e Acústica, LVA, da UFSC, utilizando um microfone de equalização de campo livre (microfone capacitivo de ½ polegada). O procedimento da construção do aparato (parede refletora e suporte para microfone) e da medição da pressão sonora nos 145 pontos determinados é descrito a seguir.

#### 4.2. Construção da parede refletora (*baffle*)

As medições dos pontos em torno do condicionador de ar precisavam ser realizadas em condições próximas das quais esse tipo de aparelho funciona normalmente. Sendo assim, é necessário que o aparelho seja instalado em uma superfície refletora (similar a uma parede), que isole o ruído da parte traseira do aparelho, como uma espécie de barreira (*baffle*) infinita.

A estrutura foi montada em um dos cantos da câmara semi-anecóica, a fim de proporcionar a absorção do ruído da parte traseira do aparelho condicionador de ar, que ficaria confinado no espaço formado entre a estrutura montada e as duas paredes, o teto e o chão. A Figura 4.1 ilustra o posicionamento do aparato dentro da câmara.

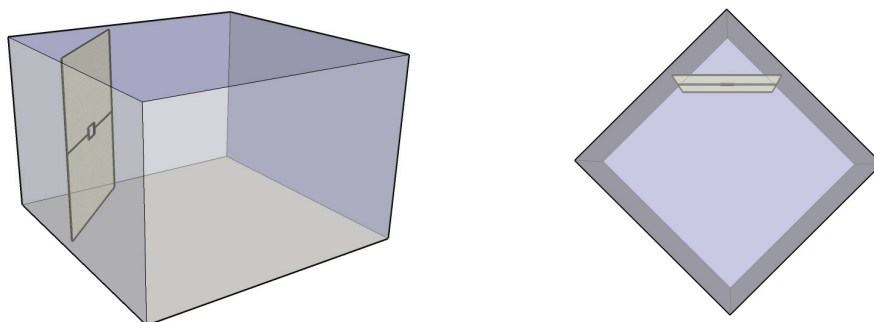


Figura 4.1 – Modelo simplificado das placas da parede refletora montadas dentro da câmara semi-anecóica. À esquerda, a vista isométrica e, na direita a vista superior.

No entanto, o objetivo dessa fase do estudo era avaliar a direcionalidade do ruído proveniente do aparelho, desconsiderando o ruído proveniente da vibração da parede em virtude do contato mecânico com a fonte. Logo, a estrutura que suporta o ar-condicionado, posicionada na parte traseira da parede, não deve apresentar pontos de contato mecânico com nenhuma parte da parede refletora. Foi utilizada, então, uma camada de espuma de poliuretano para fazer a vedação do espaço de folga entre as duas estruturas. O resultado

esperado dessa solução é isolar boa parte do ruído proveniente da parte traseira do aparelho condicionador de ar, conferindo maior confiabilidade às medições.

Para a construção da estrutura que suporta a parede refletora, levou-se em consideração que a mesma deveria ter boa resistência mecânica devido à elevada massa que suporta. A estrutura de suporte do condicionador de ar, em forma de mesa, seguiu o mesmo procedimento. Optou-se por barras de aço de perfil retangular, tubular, popularmente conhecidas por metalon. A Figura 4.2 ilustra o projeto da montagem, em duas vistas distintas. A Figura 4.3 mostra uma foto do aparato já construído. Detalhes do material utilizado na construção da parede refletora e da instalação do aparelho de ar-condicionado na estrutura são apresentados no Apêndice A.

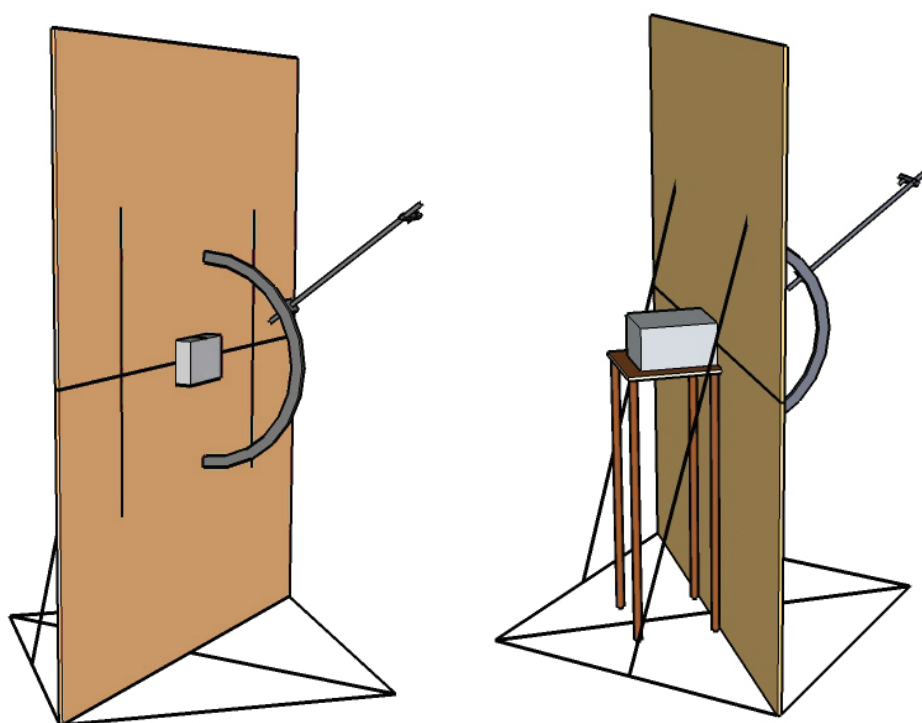


Figura 4.2 – Ilustração do projeto da estrutura do *baffle*.

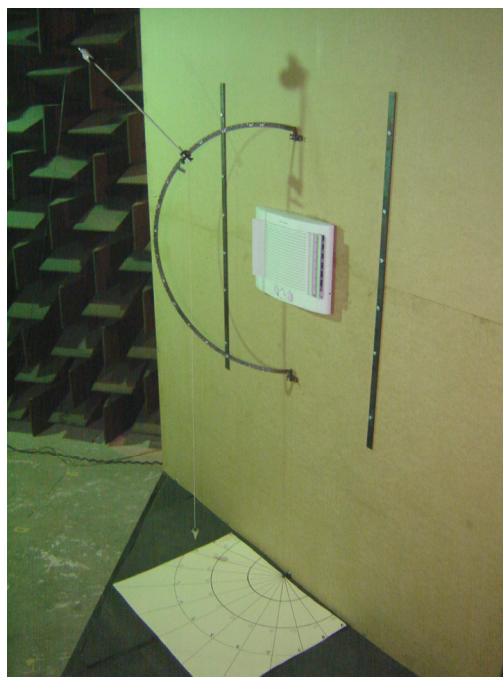


Figura 4.3 – Estrutura da parede refletora (*baffle*), com o aparelho condicionador de ar instalado, a referência de ângulo horizontal no chão e o sistema arco-haste-microfone montado.

#### 4.3. Medição da pressão sonora

A tarefa de extrair dados complexos de fontes sonoras para uso em auralizações não é trivial. Vários itens devem ser levados em consideração, como:

- As bandas de frequência de interesse;
- A distância entre a fonte sonora e o microfone;
- A precisão necessária para o posicionamento do microfone;
- A estabilidade do ambiente e da cadeia de medição.

Por mais que seja desejável uma análise em frequência em banda estreita, foram feitas medições considerando bandas de oitava por duas razões principais: o programa de simulação comercial disponível, RAYNOISE, trabalha com tabelas que relacionam características com bandas de oitava somente e a quantidade de dados a serem analisados seria superdimensionada, visto que o objetivo do trabalho não se encerra somente em caracterização de fontes sonoras.

Os formatos de dados mais usados hoje em dia para caracterização de fontes sonoras trabalham com resolução de 10 graus, tanto para o plano horizontal como para o vertical. No entanto, uma resolução de 15 graus é perfeitamente aceitável para fontes simples com simetria axial. O algoritmo utilizado pelos programas de simulação em geral se baseia no método de

fontes equivalentes, onde o somatório das fontes virtuais fornece então uma estimativa da pressão resultante para cada direção. Uma resolução baixa só funcionaria para baixas frequências, onde a direcionalidade varia lentamente.

O método de harmônicos esféricos é outra maneira de caracterizar a direcionalidade e já motivou várias pesquisas, como por exemplo, a de James Angus [AES]. Também há referências sobre harmônicos esféricos relacionados a *Ambisonics* [SHARMONIC] [AMBISONICS][MATHWORLD]. No Brasil, outras instituições também estão conduzindo pesquisas nessa área [AUDIENCE].

As medições do campo sonoro ao redor do aparelho condicionador de ar foram feitas câmara semi-anecóica, com um único microfone, posicionado na extremidade de uma haste que se desloca ao longo de um arco móvel operado manualmente, que combina rotações horizontais e verticais para cobrir uma área hemisférica.

O aparelho condicionador de ar foi posicionado no centro do arco. Para cobrir todo o campo sonoro de interesse, o microfone foi passado a cada medição por posições com incrementos de 15 graus (horizontal e vertical). As 13 posições horizontais foram representadas por letras de *A* a *M* e as 13 posições verticais numeradas de *1* a *13*. Essa denominação foi necessária para organizar melhor os dados na plataforma de aquisição *Pulse Labshop*®.

Considerando que as posições *1* e *13* são centrais e não sofrem rotação horizontal, foram medidas no total 145 posições de microfone. A Figura 4.4 ilustra a posição *13*.

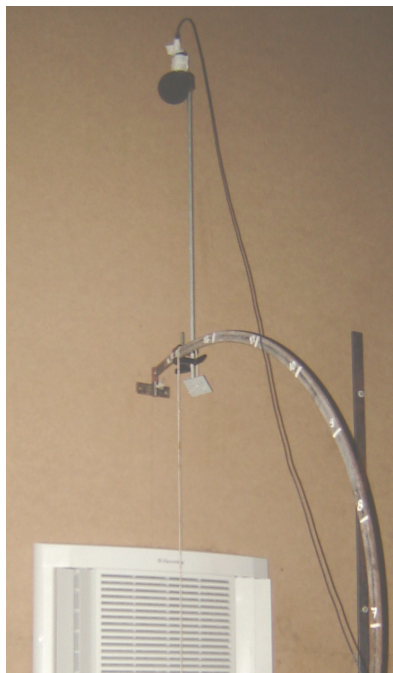


Figura 4.4 - Representação da posição 13 de microfone.

Para o controle da posição no plano vertical foram feitas marcações na própria estrutura do arco. Já a posição no plano horizontal foi controlada por um prumo (peso pendurado por uma corda) tendo como referência um diagrama de angulação posicionado na base do aparato, que se encontrava forrada por espuma de poliuretano. O diagrama é demonstrado na Figura 4.5. A precisão desse procedimento para o posicionamento do microfone no plano horizontal depende do alinhamento do ponto que sustenta o prumo com o ponto em que se encontra a cápsula do microfone. O ajuste é feito manualmente e está sujeito a erros de paralaxe.

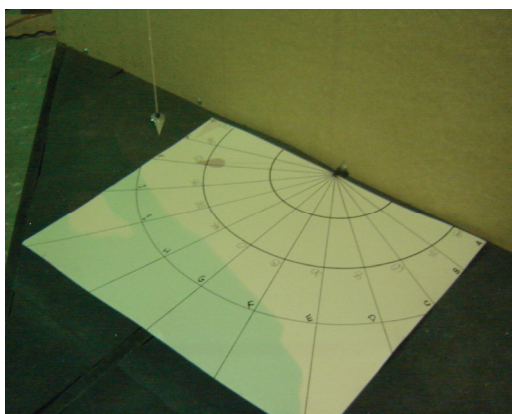


Figura 4.5 – Diagrama angular horizontal de referência com prumo.

Existem diferentes campos acústicos relacionados à distância da fonte sonora, sendo que se as medições forem realizadas muito próximas da fonte, o nível de pressão sonora pode variar significativamente com uma pequena mudança de posição. A região onde isto ocorre é chamada campo próximo, definido como o campo que compreende as regiões situadas a menos do comprimento de onda da frequência mais baixa considerada ou, alternativamente, a menos do dobro da maior dimensão da fonte sonora. Na prática, o campo seguro para se fazer medições situa-se entre o campo próximo e o reverberante (se houver), e é conhecido como campo afastado (*far-field*). Em câmara semi-anecóica, não havendo campo reverberante, considera-se todo o campo entre o campo próximo e as proximidades das cunhas absorvedoras como *far-field*. Esse campo tem propriedades próximas ao do campo livre e é caracterizado pelo fato do nível de pressão sonora decair 6 dB para cada duplicação de distância a partir da fonte, considerando uma fonte pontual. Tal teste foi realizado e verificou-se que o posicionamento do microfone na haste do aparato satisfazia aos requisitos. O campo afastado também pode ser calculado através da Equação 4.1 [GERGES, 2000], como segue:

$$l > [\text{maior comprimento de onda}] \text{ ou } [2 \times (\text{maior dimensão da fonte})] \quad (4.1)$$

sendo  $l$  a distância entre a fonte sonora e o ponto de medição.

O teste de repetibilidade para o procedimento de medição foi realizado pela comparação de dados de pressão sonora do ruído feitas ao longo do tempo. As diferenças encontradas por banda de frequência foram menores que 1 dB exceto nas posições correspondentes a 0° vertical - 90° horizontal, 15° vertical - 90° horizontal (Figura 4.6), 245° vertical - 90° horizontal, 0° vertical - 270° horizontal, 15° vertical - 270° horizontal e 245° vertical - 270° horizontal que são posições muito próximas dos limites laterais do *baffle* e sem muita importância na prática, visto que na simulação representarão pontos quase tangentes à parede da sala.

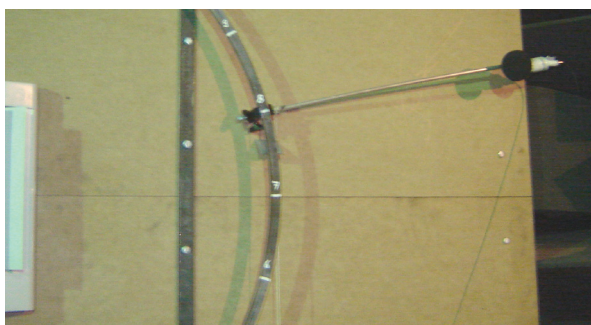


Figura 4.6 - Representação do ponto 15° vertical - 90° horizontal.

As medições foram realizadas durante os períodos em que o compressor do aparelho condicionador de ar estava acionado, pois esta é uma contribuição importante para o nível global. O aparelho foi posicionado na estrutura de forma similar à fixação de um aparelho comum na parede, com um avanço de 10 cm a partir da superfície, como mostra a Figura 4.7.

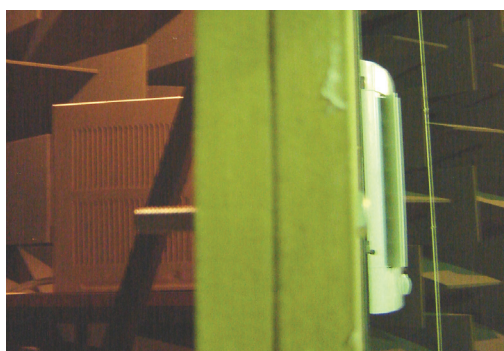


Figura 4.7 - Vista lateral do aparato.



O ponto central do painel do aparelho foi considerado o ponto central da esfera resultante da revolução completa do arco que suporta o microfone em relação ao eixo  $z$  (vertical).

A velocidade do fluxo de saída de ar foi mantida no máximo (posição *II*), pois o ruído de escoamento de ar contribui bastante para o nível global de ruído do aparelho. O condicionador de ar possui dois controles de direção de vento, que foram mantidos a 45 graus durante todas as medições. A influência do vento no nível de pressão sonora captado pelos microfones em algumas posições, principalmente as situadas à frente da saída de ar, foi reduzida através da utilização de um protetor de vento acoplado ao equipamento de medição, que não interfere de forma significativa no nível de pressão sonora medido. Foram gravadas amostras para comparação e os resultados comprovaram a eficiência da proteção de espuma.

Os equipamentos usados para as medições foram um microfone de equalização de campo livre da Brüel & Kjaer (microfone capacitivo de ½ polegada), uma plataforma de aquisição de dados Brüel & Kjaer PULSE associada a um microcomputador. Este aparato é apresentado na Figura 4.8 (equipamento) e Figura 4.9 (montagem no interior da câmara).

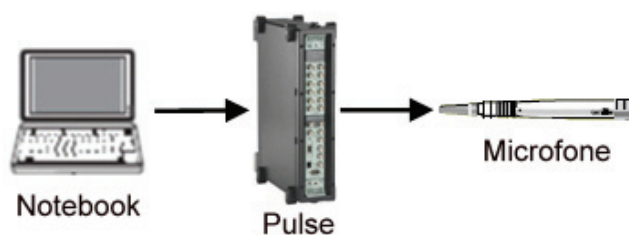


Figura 4.8 – Ilustração do equipamento utilizado.



Figura 4.9 – Equipamento de medição no interior da câmara.

Os arquivos de saída, com os pontos de medição analisados, possuem o formato de texto. Uma rotina foi gerada para calcular o nível de pressão sonora e expressar os dados em decibéis, por ser o formato de leitura do programa de simulação RAYNOISE, único dos programas estudados neste trabalho que permite a entrada dos dados da direcionalidade da fonte sonora. O programa de simulação considera, tanto para o eixo vertical como para o horizontal, ponto a ponto do diagrama, uma atenuação relativa ao valor de referência de 0 dB. Esse valor de referência é atribuído ao valor do ponto central do diagrama.

#### **4.4. Diagramas de direcionalidade**

Neste item serão apresentados os diagramas de direcionalidade das fontes sonoras estudadas. Uma versão demo do programa CATT [CATT-ACOUSTIC] permite criar diagramas de direcionalidade no formato texto *SD0* (resolução de 15 graus) e *SD1* (resolução de 10 graus). Esse programa foi utilizado somente para a visualização gráfica dos diagramas. Para a simulação feita no programa RAYNOISE, a direcionalidade medida do ar-condicionado e a direcionalidade do violão e da voz, disponibilizadas na página eletrônica do *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* [PTB], foram inseridas através da interface do próprio programa.

##### **4.4.1. Direcionalidade do aparelho de ar-condicionado**

Os dados de pressão sonora do aparelho de ar-condicionado foram processados de forma que seus valores puderam ser usados para criar um arquivo no formato *SD0-TXT*. A parte do diagrama relativa à traseira do aparelho de ar condicionado (parte de trás do *baffle*) foi fixado em -50 dB, para representar o funcionamento do aparelho fixado em uma parede, onde a parte traseira não contribui para o nível global de emissão sonora.

O método usado para medir os pontos com 15 graus de resolução, para caracterizar a direcionalidade do condicionador de ar, extrapola a quantidade de pontos necessários para o formato *SD0*, já que este não permite a entrada de dados para uma base completa, mas na verdade realiza uma interpolação polar entre os eixos principais (horizontal e vertical). Para usar o formato *SD1* (maior resolução), é necessária a medição dos pontos em resolução de 10 graus.

A Figura 4.10 ilustra as direções adotadas nos diagramas e, nas Figuras 4.11 a 4.14, são apresentados diagramas de direcionalidade para o aparelho de ar-condicionado medido.



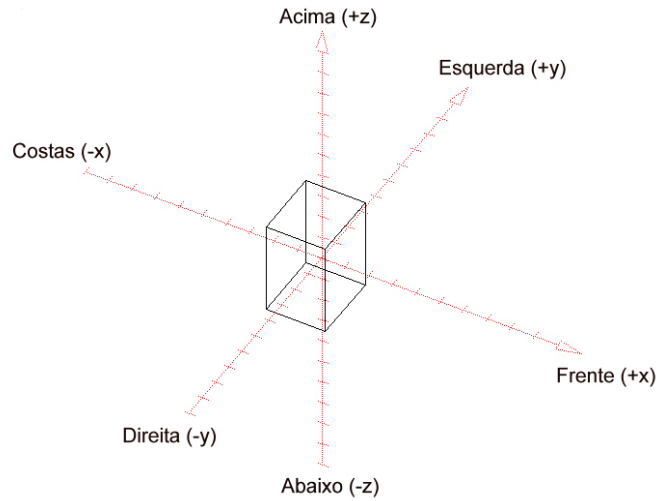


Figura 4.10 - Direções convencionadas no diagramas do ar-condicionado.

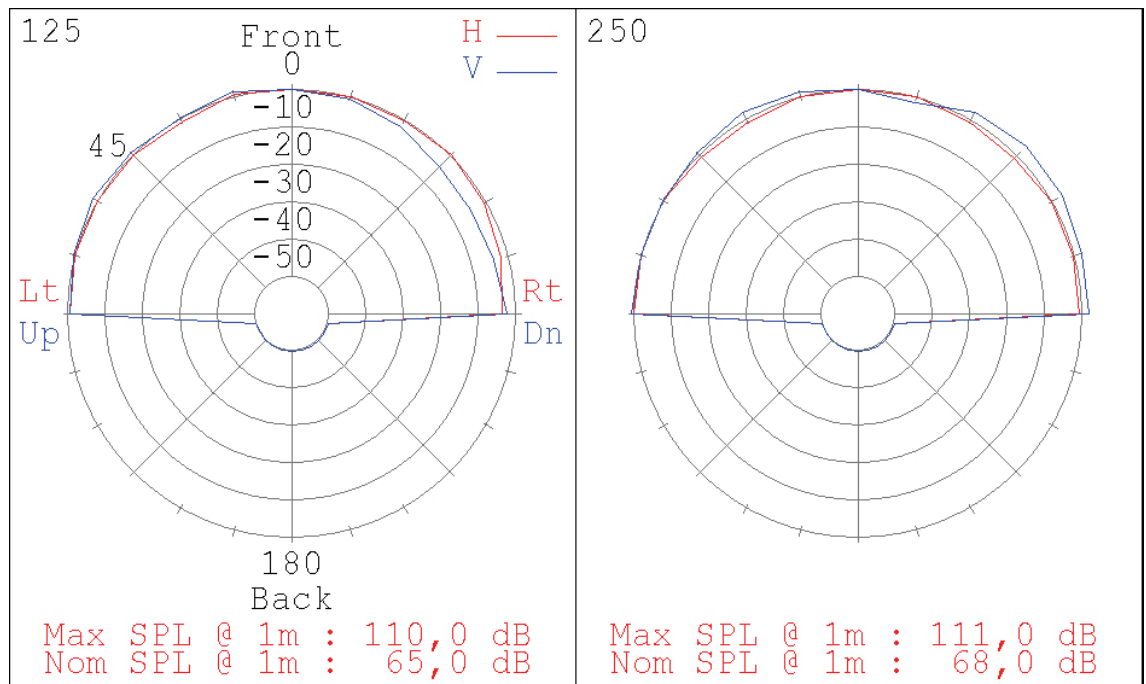


Figura 4.11 – Diagramas polares de direcionalidade do aparelho de ar-condicionado, para as bandas de frequência de 125Hz e 250Hz. Cor vermelha – Plano horizontal; Cor azul – Plano vertical.

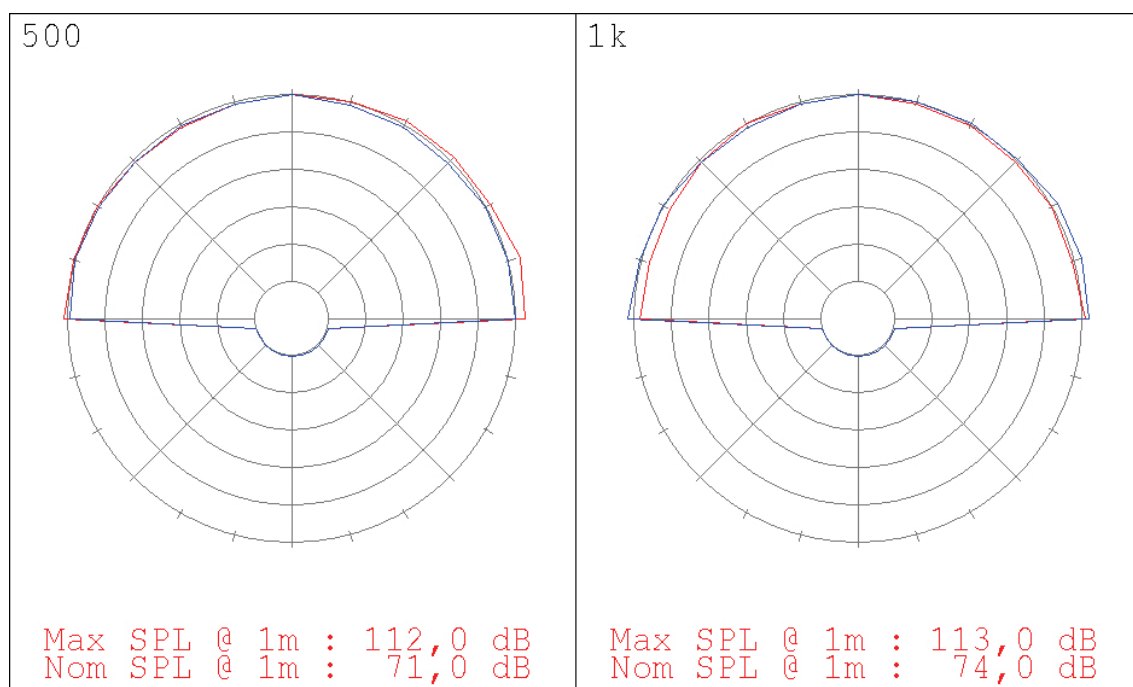


Figura 4.12 – Diagramas polares de direcionalidade do aparelho de ar-condicionado, para as bandas de frequência de 500Hz e 1kHz. Cor vermelha – Plano horizontal; Cor azul – Plano vertical.

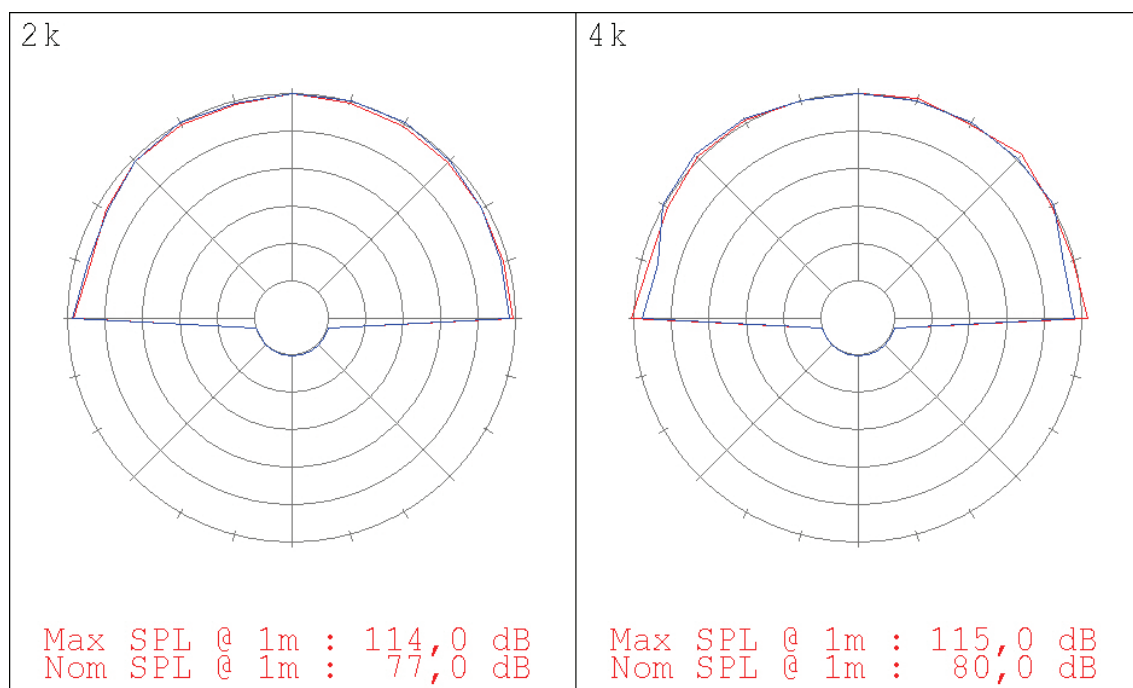


Figura 4.13 – Diagramas polares de direcionalidade do aparelho de ar-condicionado, para as bandas de frequência de 2kHz e 4kHz. Cor vermelha – Plano horizontal; Cor azul – Plano vertical.

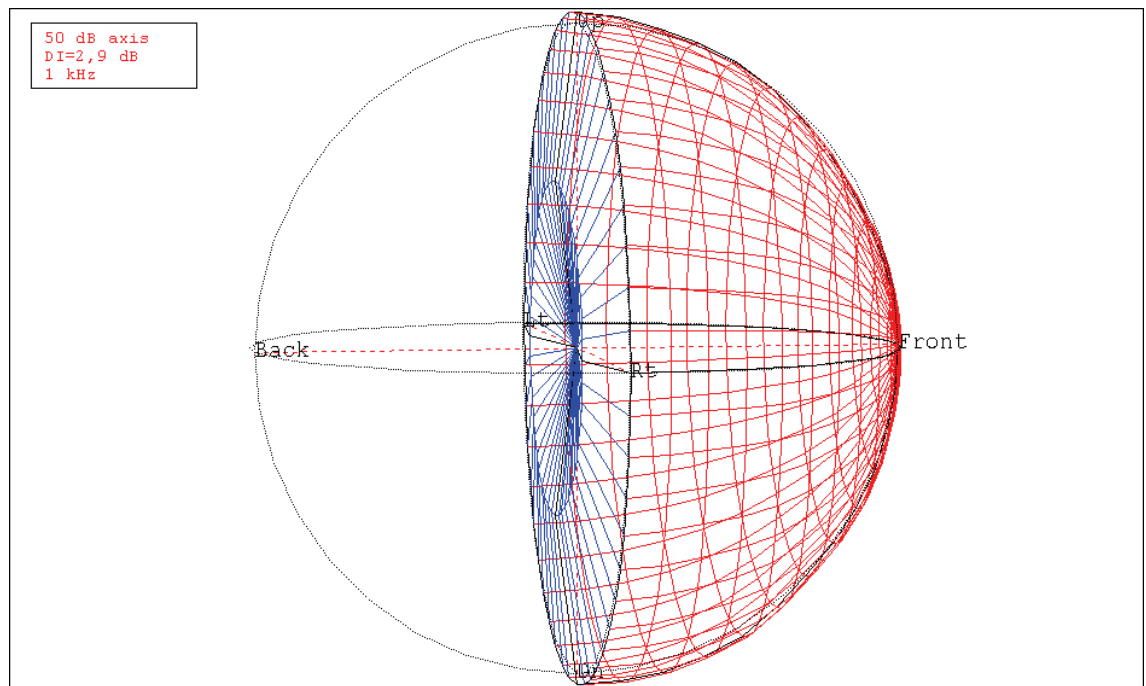


Figura 4.14 – Balão de direcionalidade (por interpolação) do aparelho de ar-condicionado, para a frequência de 1kHz.

Como pode ser visto através das figuras, a fonte sonora estudada (condicionador de ar) não apresentou variações significativas na direcionalidade, mesmo para frequências mais altas. Para estudar um pouco mais o efeito da direcionalidade, foram escolhidas duas outras fontes: a voz humana e o violão. Sendo assim, foram feitas gravações em câmara semi-anecóica e utilizadas informações de direcionalidade de violão e de voz já disponíveis [PTB]. Depois, foi feita a conversão para o formato padrão de direcionalidade do RAYNOISE. Cabe lembrar que o outro programa estudado (MÓDULOS) não possui entrada de dados de direcionalidade da fonte sonora.

#### 4.4.2. Direcionalidade da voz

É necessário questionar se há diferenças nos padrões de direcionalidade de diferentes níveis de conversação. Segundo a pesquisa realizada por CHU e WARNOCK (2001), nenhuma diferença significativa foi observada entre níveis normais e níveis altos. Em relação a idiomas diferentes, a média resultante para a língua francesa é comparável à da língua inglesa. Finalmente em relação às diferenças entre a voz masculina e feminina, não há diferença significativa entre os padrões de direcionalidade, embora os conteúdos espectrais sejam diferentes. A Figura 4.15 ilustra as convenções utilizadas para a voz. Nas Figuras 4.16 a 4.19, são apresentados diagramas de direcionalidade para a voz humana.

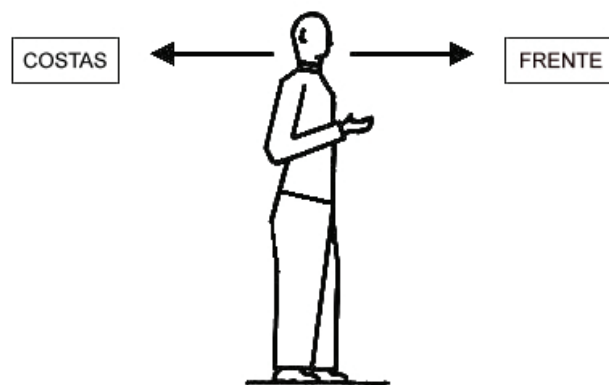


Figura 4.15 – Convenções de direção para a voz humana.

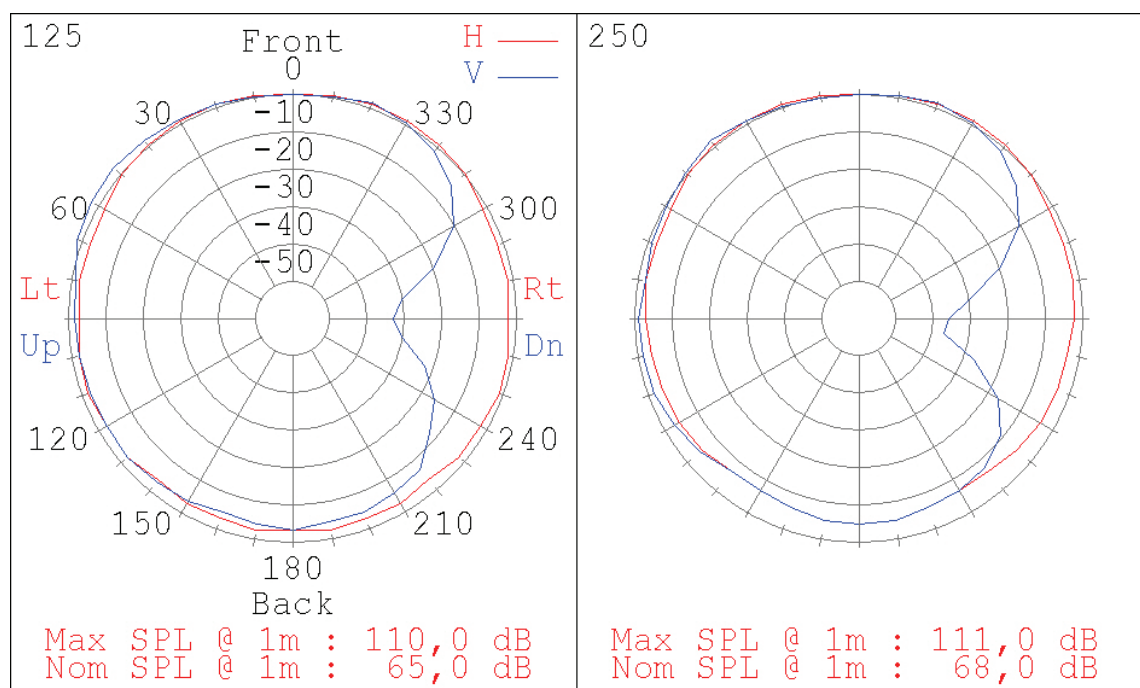


Figura 4.16 – Diagramas polares de direcionalidade da voz humana, para as bandas de frequência de 125Hz e 250Hz. Cor vermelha – Plano horizontal; Cor azul – Plano vertical.

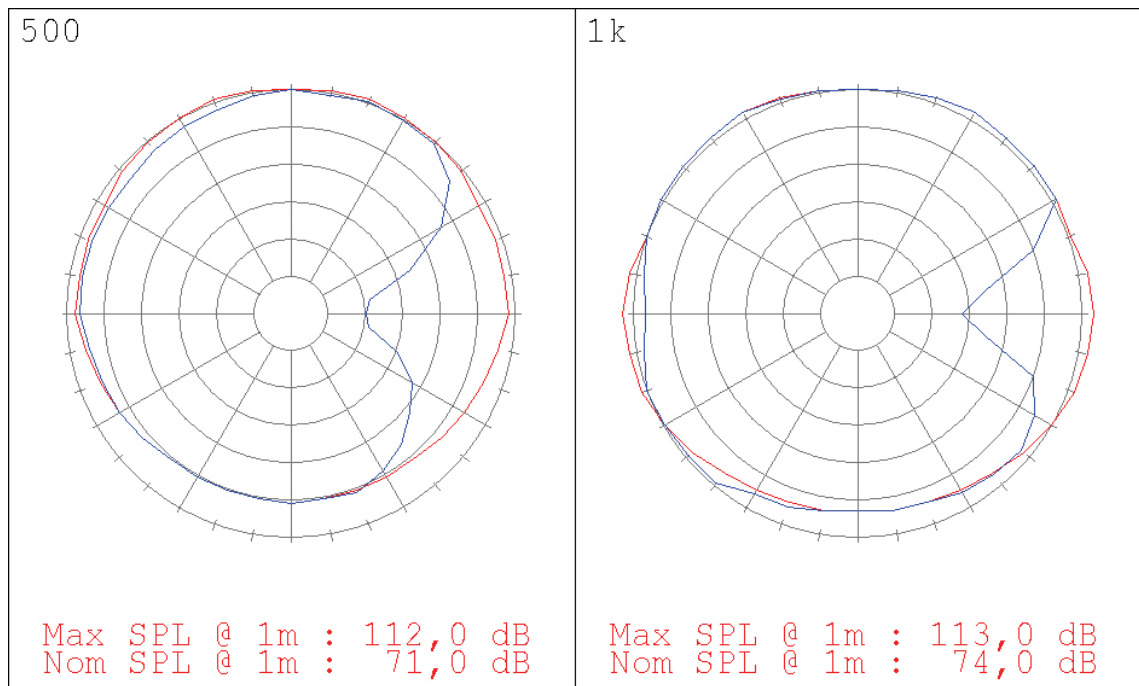


Figura 4.17 – Diagramas polares de direcionalidade da voz humana, para as bandas de frequência de 500Hz e 1kHz. Cor vermelha – Plano horizontal; Cor azul – Plano vertical.

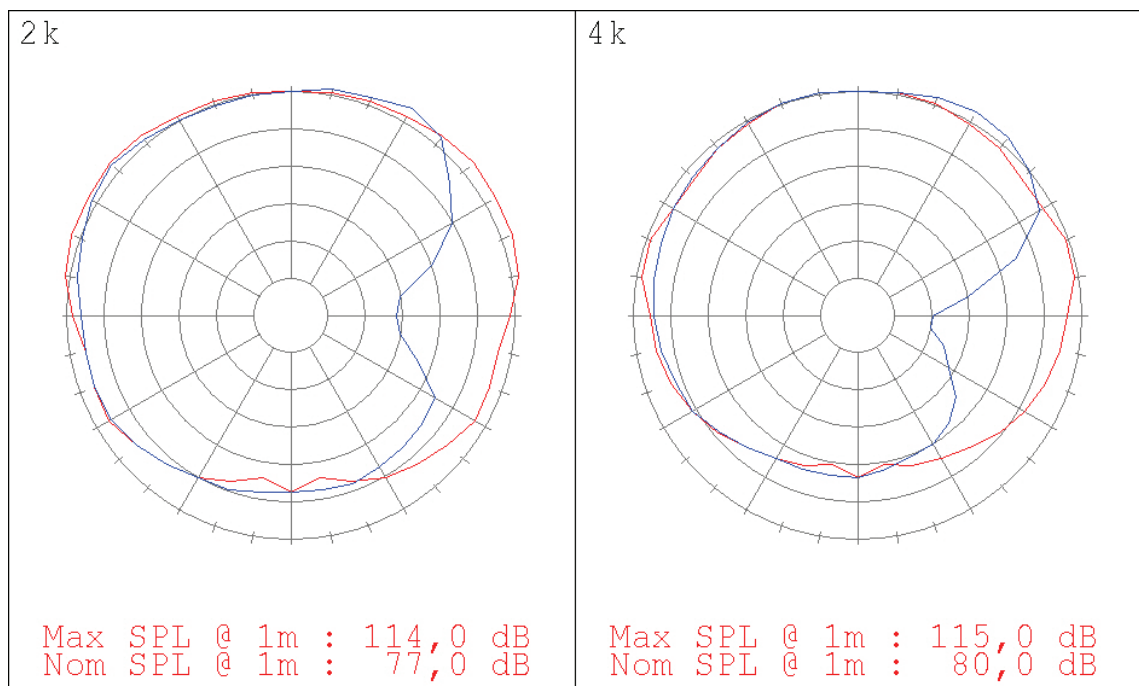


Figura 4.18 – Diagramas polares de direcionalidade da voz humana, para as bandas de frequência de 2kHz e 4kHz. Cor vermelha – Plano horizontal; Cor azul – Plano vertical.

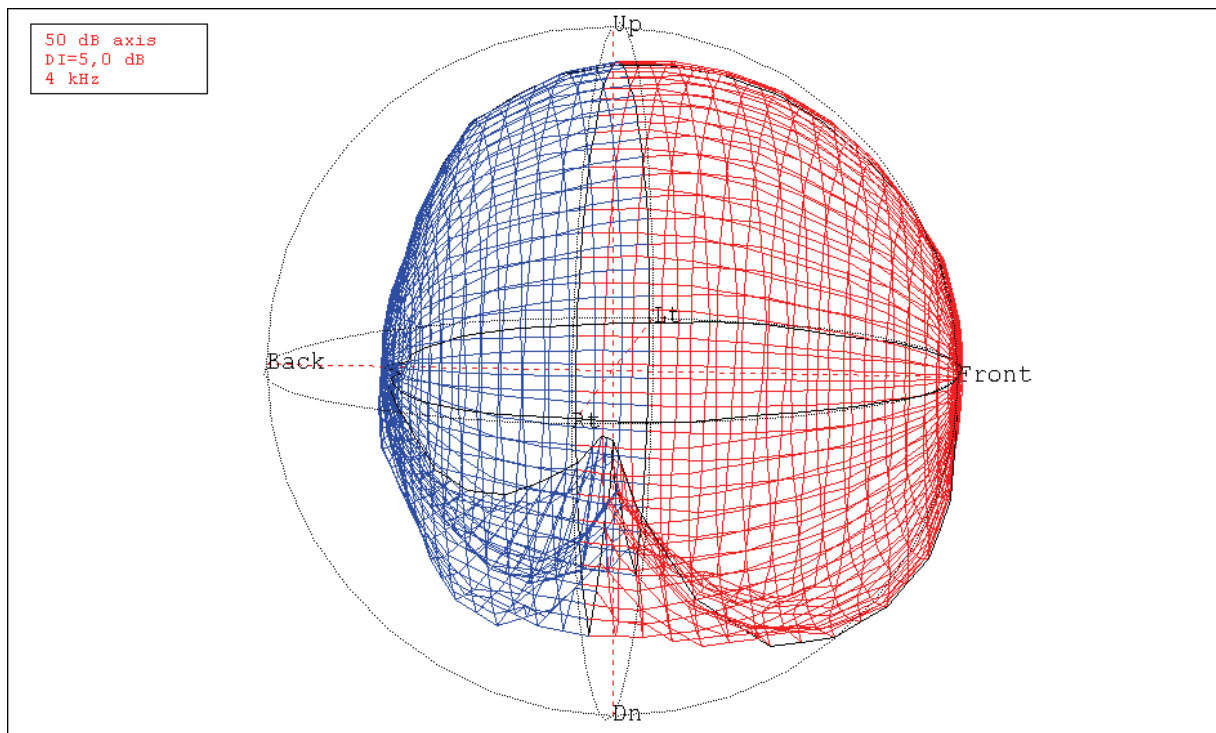


Figura 4.19 – Balão de direcionalidade (por interpolação) da voz humana, para a frequência de 4kHz.

#### 4.4.3. Direcionalidade do violão

A seguir, são apresentados diagramas de direcionalidade, em bandas de oitava, para o violão. Estes dados foram obtidos em um banco de dados publicado [PTB] e visualizados a partir da versão demo do CATT. A Figura 4.20 ilustra as convenções utilizadas para a voz. Nas figuras 4.21 a 4.23, são apresentados diagramas de direcionalidade para o violão.

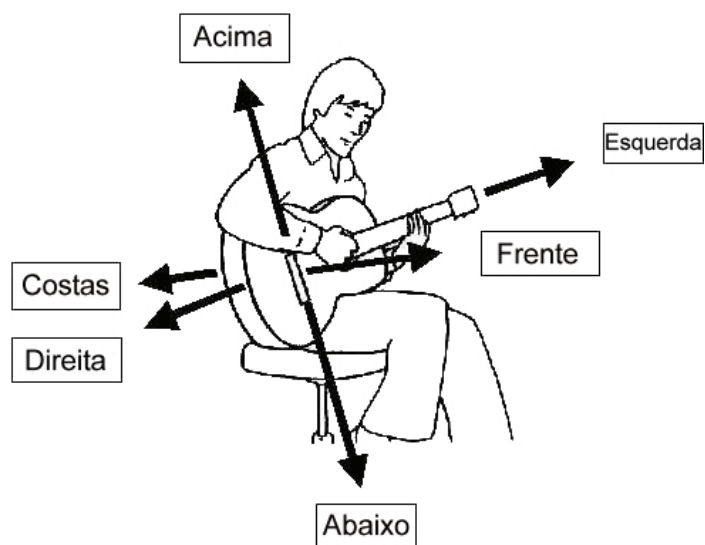


Figura 4.20 – Representação das direções convencionadas para os diagramas do violão.

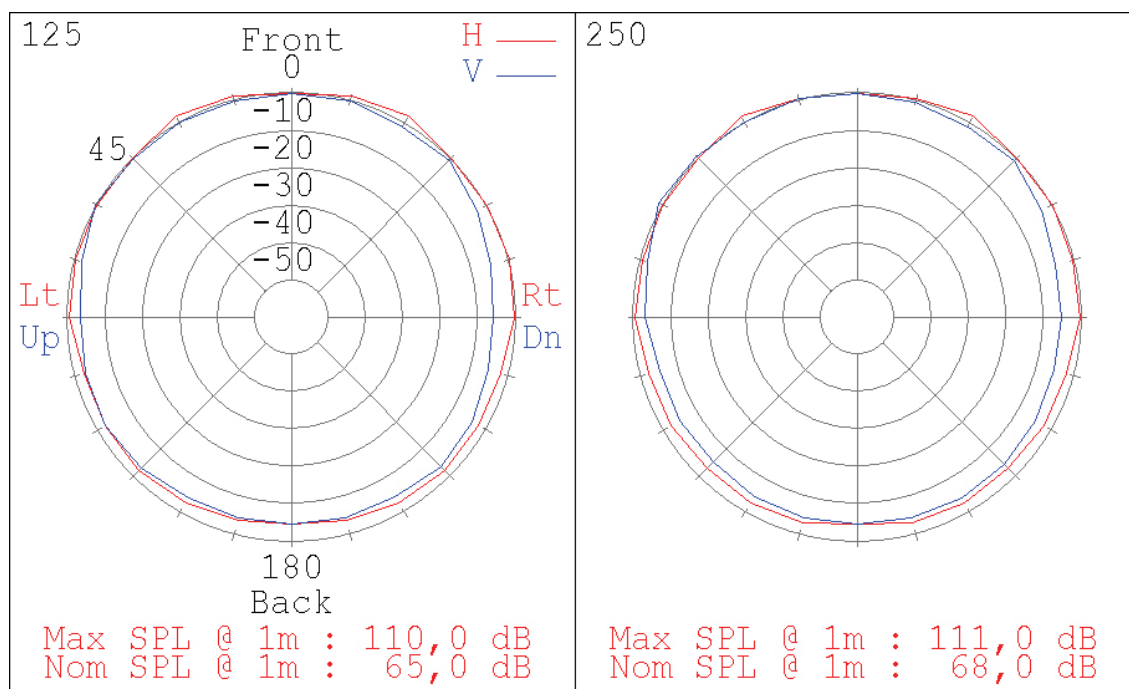


Figura 4.21 – Diagramas polares de direcionalidade do violão, para as bandas de frequência de 125Hz e 250Hz.

Cor vermelha – Plano horizontal; Cor azul – Plano vertical.

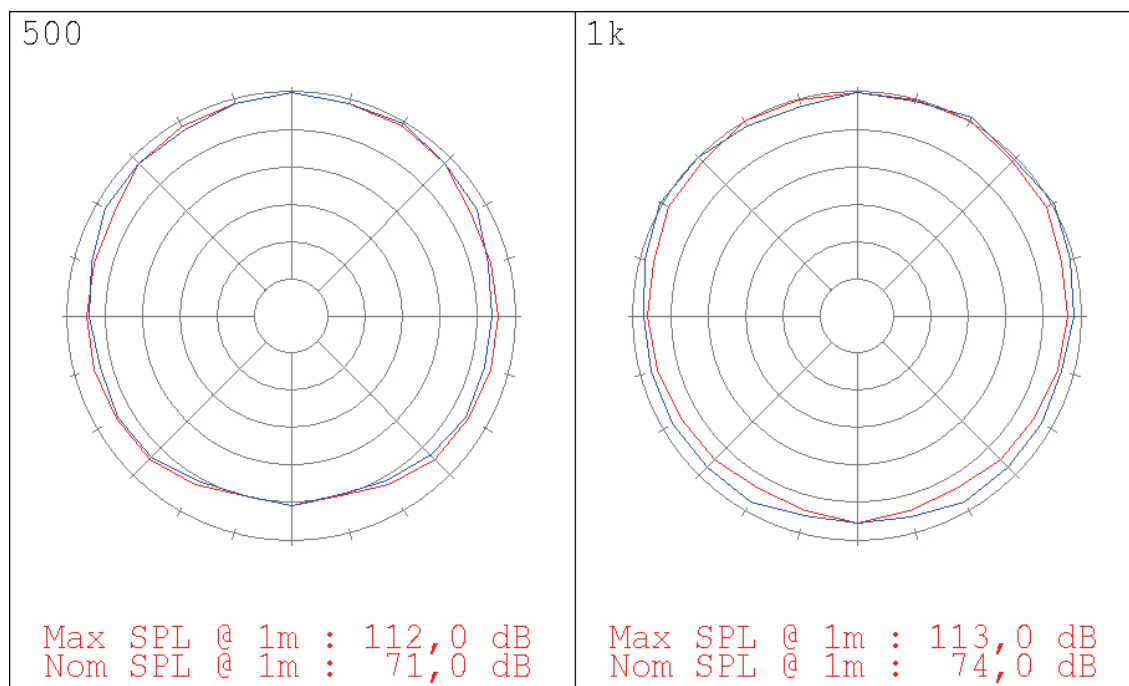


Figura 4.22 – Diagramas polares de direcionalidade do violão, para as bandas de frequência de 2kHz e 4kHz.

Cor vermelha – Plano horizontal; Cor azul – Plano vertical.



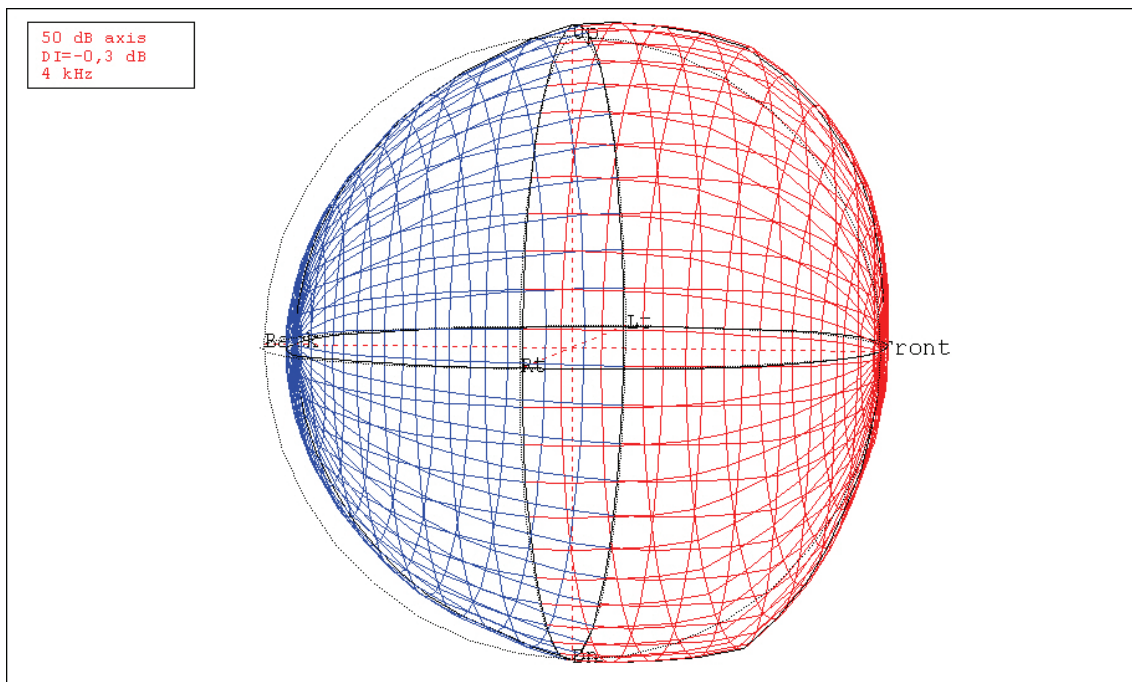


Figura 4.23 - Balão de direcionalidade (por interpolação) do violão para a frequência de 4kHz.



## CAPÍTULO 5

### CADEIA DE GRAVAÇÃO E REPRODUÇÃO

As gravações anecóicas são fundamentais para o processo de auralização, em sua etapa final. As gravações binaurais foram utilizadas como referência na validação dos resultados das simulações, através da reprodução via fones de ouvido. Neste capítulo são discutidos os métodos utilizados para todas as gravações e reproduções realizadas ao longo do trabalho.

#### 5.1. Gravações de canal único

Quando ouvimos um som na vida real, trata-se de uma combinação inseparável do som produzido pela fonte sonora e as influências do ambiente em que fonte e ouvinte se encontram. O que se obtém ao se cancelarem as influências referentes às reflexões que ocorrem dentro de um ambiente é um som “seco”. É possível fazer gravações dessa forma e um arquivo de áudio sem reverberação é bastante útil para avaliarem-se precisamente as características acústicas de uma sala através de simulação.

Gravações deste tipo são realizadas em câmara anecóica e são denominadas gravações anecóicas ou gravações secas. As câmaras anecóicas são salas isentas de reverberação, pelo menos teoricamente. Essa característica é obtida pelo uso de material de absorção sonora nas superfícies para a absorção das reflexões, só permitindo o som direto entre a fonte sonora e o receptor (por exemplo, um microfone). A Figura 5.1 mostra um exemplo de um microfone montado em um tripé, ao lado das cunhas de material absorvedor que revestem a parede da câmara.



Figura 5.1 – Microfone de campo livre montado no interior da câmara.

No entanto, pela necessidade de um solo suficientemente rígido para a locomoção das pessoas e fixação dos equipamentos, algumas câmaras possuem o piso de concreto. A esse tipo de câmara se dá o nome de semi-aneecóica.

Apesar de não serem efetivamente “aneecóicas”, por terem sido feitas na câmara semi-aneecóica disponível, serão denominadas dessa forma para facilitar a nomenclatura, esclarecendo que tratam-se de sons sem reverberação. Estes sons de canal único serviram de “matéria-prima” para as auralizações realizadas. As gravações aneecóicas deste trabalho foram realizadas na câmara semi-aneecóica do Laboratório de Vibrações e Acústica da UFSC.

Os equipamentos usados para as gravações aneecóicas foram um microfone com equalização de campo livre da Brüel & Kjaer (microfone capacitivo de ½ polegada), conectado a uma plataforma de aquisição de dados Brüel & Kjaer PULSE associada a um microcomputador.

As fontes sonoras gravadas<sup>5</sup> foram: um violão, a voz humana e um aparelho de ar-condicionado. Foram gravadas amostras dos sons de cada fonte sonora separadamente, utilizando um microfone localizado a 1 metro à frente da fonte sonora. Cada amostra gravada possui entre 10 e 20 segundos. Utilizou-se uma taxa de amostragem de 44100 amostras por segundo. Como o microfone foi calibrado antes de todas as gravações, os níveis de pressão sonora obtidos nessas gravações podem ser posteriormente reproduzidos.

O ruído de fundo medido na câmara, no mesmo ponto onde foi feita a gravação da voz e do violão, é apresentado em bandas de oitava na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Nível de pressão sonora do ruído de fundo medido no interior da câmara semi-aneecóica.

<b>Banda (Hz)</b>	<b>NPS [dB]</b>
63	31,7
125	27,8
250	23,8
500	31,2
1000	28,1
2000	27,9
4000	29,5
8000	29,3

---

<sup>5</sup> O violão de sete cordas foi fabricado pelo *Luthier* Rogério dos Santos (RJ), a voz utilizada foi a do aluno de pós-graduação Marcelo Portela e o aparelho de ar-condicionado foi gentilmente cedido pela empresa ELECTROLUX para esta pesquisa.

Primeiramente, aproveitou-se a montagem da estrutura do ar-condicionado (ver Capítulo 4, Seção 4.2) para realizar as gravações em condições próximas de seu funcionamento usual. Como o ruído da fonte é de característica estacionária, a fonte foi mantida em operação e foram registradas amostras de seu ruído somente dentro dos períodos em que o compressor se encontrava em operação. Esta etapa é ilustrada pela Figura 5.4.



Figura 5.4 – Microfone posicionado a 1 m da fonte sonora para as gravações anecóicas do ar-condicionado.

As gravações anecóicas e os níveis medidos relativos ao aparelho de ar condicionado foram utilizados também por outros pesquisadores no estudo das diferenças entre as funções de transferência relacionadas à cabeça entre crianças e adultos, no Instituto de Acústica Técnica, na Universidade de Aachen, que resultou em um artigo, apresentado no *International Symposium on Room Acoustics* [FELS, SCHRÖDER e VORLÄNDER, 2007].

Para as gravações das fontes não-estacionárias, que dependiam de uma sincronização entre a execução do som e o acionamento do equipamento para a gravação, foi necessária a ajuda de uma pessoa para operar o computador enquanto outra executava o instrumento musical ou lia o texto proposto, como ilustram as Figuras 5.5 e 5.6.



Figura 5.5 – Gravação do violão em câmara semi-aneecóica, com microfone a 1m de distância.

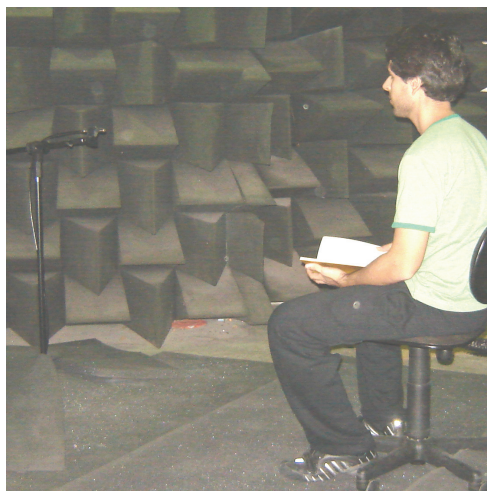


Figura 5.6 – Gravação da voz em câmara semi-aneecóica, com microfone a 3m de distância.

## 5.2. Gravações biaurais

Existem dois métodos principais de gravação binaural, o sistema de gravação com pessoas e o que utiliza modelos parciais de pessoas, os manequins. O método utilizado nessa etapa do estudo foi o manequim, apresentado na Figura 5.7. Os manequins são imitações parciais do homem, sobretudo do sistema auditivo e de algumas outras partes importantes que têm influência no som. No lugar dos ouvidos há simulações dos pavilhões auditivos e aí se encontram microfones de campo de pressão, geralmente capacitivos.

Usualmente os manequins também são chamados de cabeça artificial (*artificial head* ou *dummy head*), o que na verdade não é a denominação correta, já que os manequins possuem também outros elementos que têm influência no campo sonoro, como os ombros e o

tronco. Portanto, uma denominação mais adequada seria simplesmente a de manequim ou simulador de cabeça e tronco (HATS – *head and torso simulator*).



Figura 5.7 – Manequim (*dummy head*) para gravação biaural.

O manequim foi posicionado em duas configurações distintas dentro de uma sala de reuniões (detalhados no Capítulo 6, na seção 6.6), sendo que para cada uma delas foi gravado o som do violão e da voz, totalizando quatro gravações. O som do violão consistiu em uma sequência simples de acordes e a voz realizou a leitura de um pequeno trecho do livro *Budapeste*, de Chico Buarque. As Figuras 5.8 e 5.9 ilustram o processo.



Figura 5.8 – Aparato de gravação biaural do violão na sala de reuniões.



Figura 5.9 – Aparato de gravação biaural da voz na sala de reuniões.

O produto final de cada gravação é um arquivo de áudio biaural em formato *.wav*, contendo todas as características proporcionadas pela influência do manequim sobre o som.

### 5.3. Reprodução via fones de ouvido

O objetivo final da auralização é a reprodução, principalmente via fones de ouvido, devido à sua flexibilidade de uso em relação aos ambientes e à destinação dos sinais pertinentes a cada orelha. Para uma reprodução mais exata, seria necessária uma equalização referente à cadeia de dispositivos percorrida pelo áudio biaural. Como os resultados seriam comparados de forma relativa a uma referência, sendo todos os sinais reproduzidos através do mesmo equipamento, esta etapa não foi realizada.

Foram utilizados nas comparações binaurais fones de ouvido do modelo Sennheiser HD 580 conectados a um PC. Devem-se observar as diferenças entre os canais direito e esquerdo, pois a colocação imprópria dos fones pode alterar significativamente a cena auditiva biaural apresentada aos participantes da avaliação subjetiva (Capítulo 7). A Figura 5.10 demonstra o questionário sendo aplicado a uma ouvinte através de fones de ouvido.





Figura 5.10 – Ouvinte com fones de ouvido, respondendo ao questionário subjetivo interativo.

## 5.4. O aparelho de ar-condicionado

Não houve a oportunidade de instalação física do aparelho de ar-condicionado em estudo na sala de reuniões. A sala já possuía outro sistema de ar-condicionado (*split*) e não poderia ser alterada fisicamente. Desta forma, não foi gravado o som de referência com a fonte instalada em situação real, conforme foi realizado com a voz e o violão. No entanto, sem tal referência, não seria possível avaliar os métodos utilizados na auralização dessa fonte no ambiente simulado. Para contornar o problema, decidiu-se aproveitar uma característica muito importante da própria fonte, descoberta na etapa de caracterização de fontes sonoras (Capítulo 4, item 4.4.1): sua isotropia no hemisfério radiado. O som do ar-condicionado gravado em câmara anecóica foi então reproduzido através de uma fonte eletroacústica omnidirecional, dentro da sala real, na exata posição onde seria instalado em uma situação normal. Nessas circunstâncias, a proximidade da parede obstrui a radiação em um dos hemisférios. Essa posição de fonte também foi utilizada dentro do modelo geométrico da sala para a simulação da mesma. A proposta desta etapa foi simular a presença do condicionador de ar dentro da sala real para a gravação do som de referência por meio de fonte eletroacústica.

### 5.4.1. A gravação da referência

A gravação foi realizada através de tecnologia biaural, dessa vez, usando um sistema de gravação intra-auricular, na própria pessoa. Foram utilizados mini-microfones de eletreto posicionados dentro dos canais auditivos, fixados com silicone, como mostra a Figura 5.11. Este sistema foi escolhido para se avaliar a possibilidade da utilização desse tipo de equipamento para as gravações biaurais de referência. Os mini-microfones representam uma solução mais flexível e de custo inferior ao manequim.



Figura 5.11 – Mini-microfones inseridos no canal auditivo de uma pessoa para uma gravação intra-auricular.

A fonte eletroacústica, representada na Figura 5.12, é composta por 12 alto-falantes de 4 polegadas, que garantem uma resposta em frequência aproximadamente plana na faixa de 100 Hz a 15 kHz. Ela possui impedância nominal de 5,3 Ohms, potência RMS de 300 W e conector do tipo *Mono Phone Plug* (P10). A característica mais importante desse tipo de fonte dodecaédrica é irradiar um campo sonoro praticamente uniforme em todas as direções. Mais detalhes sobre a fonte eletroacústica podem ser encontrados no trabalho realizado por Portela [PORTELA, 2006].



Figura 5.12 - Dodecaedro Omnidirecional [PORTELA, 2006]

Os equipamentos usados para as gravações foram: um par de mini-microfones de eletreto, pré-amplificados por um sistema projetado para este trabalho, conectado a uma plataforma de aquisição de dados Brüel & Kjaer PULSE associada a um microcomputador e a fonte sonora. Para a reprodução do sinal, foi utilizado um amplificador de potência do modelo 2706, da Brüel & Kjaer. Este aparato é ilustrado na Figura 5.13 e demonstrado na Figura 5.14 (interior da sala).



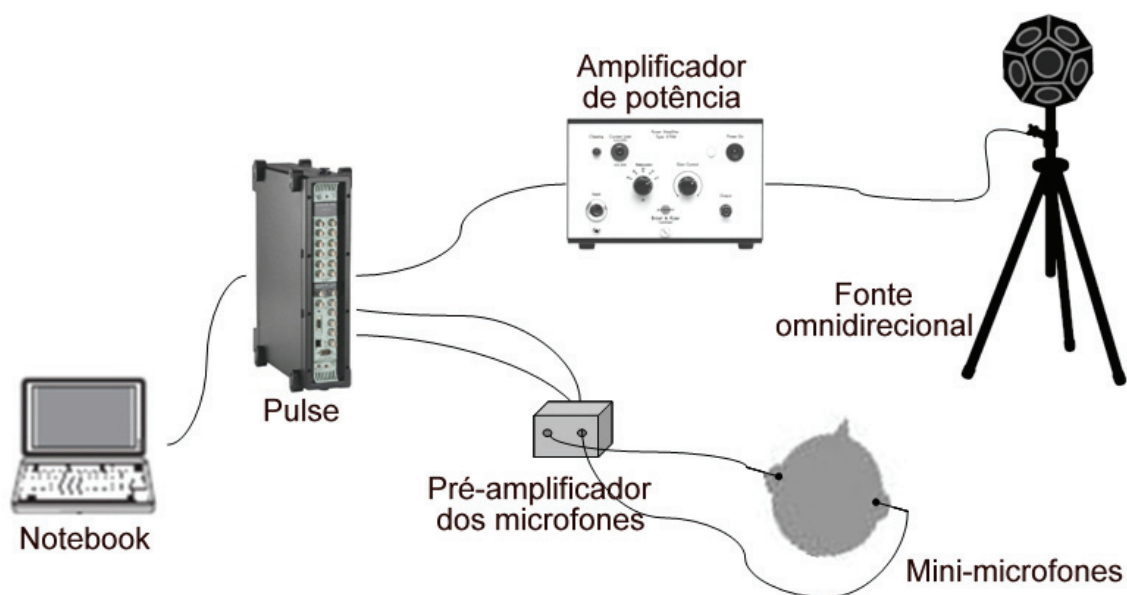


Figura 5.13 - Ilustração do equipamento utilizado nas gravações binaurais de referência do ar-condicionado.

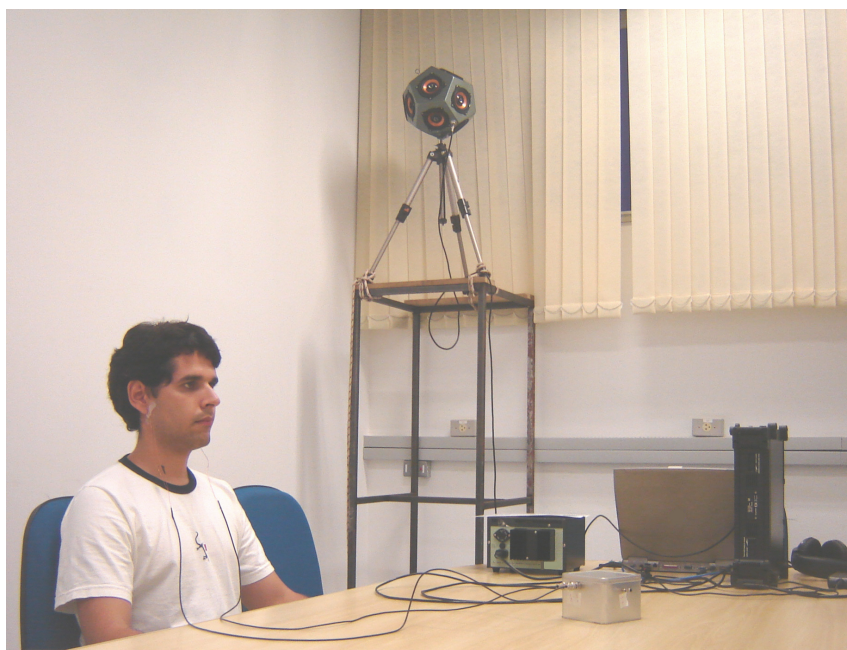


Figura 5.14 - Equipamento montado na sala de reuniões para as gravações binaurais.

Os dados obtidos foram sinais de áudio estéreo, em formato *.wav*. Esses sinais foram usados para a avaliação dos métodos aplicados na auralização do aparelho condicionador de ar na sala de reuniões como sinais de referência. Os resultados das comparações são apresentados no Capítulo 7, item 7.2.

## **CAPÍTULO 6**

### **TÉCNICAS DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO**

Neste capítulo são discutidos os métodos e programas utilizados na simulação dos elementos que compõem o sistema em estudo: fonte, meio, receptor. Também é apresentada a sala considerada em todas as simulações e as configurações fonte-receptor adotadas para as três distintas fontes sonoras consideradas.

#### **6.1. Simulação do ambiente**

O ambiente foi simulado através do programa RAYNOISE e os resultados foram comparados com os de um programa de simulação de salas que está em desenvolvimento. Detalhes de seu algoritmo podem ser encontrados em GOMES (2007). O programa é composto de três módulos: Simulação por Fontes Virtuais, Simulação por Traçado de Raios e Módulo de Convolução. O resultado de cada um dos dois primeiros módulos (de simulação) pôde ser convoluído com um som anecóico através do terceiro módulo. Este último realiza um algoritmo de convolução específico para a auralização das salas simuladas. Apesar de ainda não ter sido registrado comercialmente, ao longo dessa dissertação o programa será chamado de “MÓDULOS”.

Este capítulo discute os métodos usados para realizar a simulação acústica das fontes sonoras propostas. A aplicação desses métodos requer uma modelagem geométrica da sala, tanto para o método de traçado de raios quanto para as fontes virtuais ou o método híbrido. Os resultados são reportados no Capítulo 6.

#### **6.2. Acústica geométrica**

A simulação do ambiente é feita através de métodos geométricos, que são baseados na acústica geométrica, como visto no Capítulo 3, Item 3.1.

Em todos os programas usados a geometria é inserida através da determinação de superfícies geradas por coordenadas cartesianas. Logo após são inseridas as descrições dos coeficientes de absorção sonora para cada superfície gerada pela inserção das coordenadas. É importante que os vetores normais às superfícies estejam apontando para dentro da sala para que a simulação tenha êxito. Para isso, é preciso inserir os vértices de cada superfície no sentido anti-horário (usando a “regra da mão direita”).

Há outras restrições para a definição de superfícies, a saber:

- A superfície deve ser plana;
- Uma superfície curva precisa ser segmentada em várias superfícies planas;
- Uma superfície deve possuir três ou mais vértices;
- As coordenadas dos vértices são inseridas utilizando a unidade em metros;

### 6.3. O programa RAYNOISE

RAYNOISE é um programa de simulação do comportamento acústico no interior de um volume fechado. No que diz respeito à acústica de salas, as aplicações do RAYNOISE são:

- Cálculo da resposta impulsiva binaural através da convolução da resposta impulsiva acústica da sala com um banco de dados de HRTFs,
- Convolução com sinais anecóicos nos formatos *.wav*, *.au*, *.aiff* para a reprodução final dos resultados.

O RAYNOISE é baseado nos princípios da acústica geométrica e, portanto, sujeito às suas restrições. A modelagem assume que as ondas sonoras se comportam como raios, assim como na óptica geométrica as ondas luminosas se comportam como raios luminosos. Raios acústicos são refletidos pelas superfícies internas e perdem parte de sua energia a cada reflexão.

A modelagem utilizada é baseada em um algoritmo híbrido que combina o método das fontes virtuais e o método do traçado de raios, como já mencionado. O programa parte de um modelo geométrico, que pode ser importado de qualquer programa gerador de geometrias CAD (como o AutoCAD<sup>®</sup>) ou CAE (como o MSC/Patran<sup>®</sup>) ou pode ser gerado diretamente na interface do programa através da inserção de coordenadas cartesianas. A geometria pode ser alterada em qualquer momento, através de ferramentas e de uma interface gráfica que apresenta o modelo em diversas perspectivas. As propriedades dos materiais de revestimento podem ser atribuídas a elementos poligonais. As fontes e receptores desejados pelo usuário também são inseridas através dessa interface.

As funcionalidades utilizadas no programa RAYNOISE neste trabalho são descritas nos itens a seguir.

### 6.3.1. Caracterização de fontes sonoras

As características relativas à fonte sonora considerada em cada simulação são inseridas através de uma caixa de diálogo na própria interface do programa. O programa permite caracterizar uma fonte sonora quanto ao nível de potência sonora, por banda de frequência; posição dentro da sala, em coordenadas cartesianas; orientação, em relação ao eixo de coordenadas adotado; atraso em relação a uma referência; direcionalidade.

Na determinação da direcionalidade, é importante ressaltar o formato dos arquivos que o programa importa. É necessária a importação de dois arquivos, um para a direcionalidade em respeito ao eixo vertical e outro para o horizontal. Os pontos nos demais planos são calculados por interpolação dos planos principais. Cada arquivo texto com os dados da direcionalidade possui a extensão *‘.fre’* e contém quatro colunas, onde devem constar as informações sobre a frequência central (em Hertz) da banda de frequência considerada; ângulo (em graus) em relação a um eixo principal; atenuação (em decibéis) em relação a um valor de referência (valor a zero grau); fase (em graus) em relação a um valor de referência.

Em relação à fase mencionada, cabem alguns esclarecimentos. Uma fonte sonora pode ser considerada coerente ou incoerente. Isto influencia as distribuições de pressão sonora calculadas. As fontes coerentes incluem informação de fase, as fontes incoerentes não. Sinais que contêm muitas frequências (por exemplo, o ruído) são incoerentes. Assim, não é necessário inserir informação sobre fase na tabela de direcionalidade, caso essa fonte não seja considerada coerente.

Só é possível obter ângulos de fase ao comparar o sinal medido com um sinal de referência. Segundo o atendimento ao consumidor da LMS, empresa fabricante do programa RAYNOISE, “a referência para fase relativa é o sinal medido na direção do eixo principal. No caso de fontes de ruído, os valores da coluna relativa à fase (no arquivo texto de direcionalidade) devem ser considerados zero. Caso contrário, o programa pode interpretar de forma errônea os dados”.

### 6.3.2. Resposta impulsiva binaural

O cálculo da resposta impulsiva binaural consiste na transformação dos dados provenientes do ecograma/histograma em uma resposta impulsiva binaural finita (*BFIR*). O resultado é amostrado em uma frequência de amostragem definida pelo usuário e registrado em um arquivo de som. A resposta impulsiva binaural é o âmago do processo de auralização,

que pode depois tornar os dados da fonte sonora audíveis dentro do contexto físico-acústico analisado.

O cálculo biaural é feito com base na informação de chegada de todos os raios armazenados, combinados com as Funções de Transferência Relacionados à Cabeça (HRTFs) utilizadas pelo RAYNOISE, que provêm de um banco público de dados. A cabeça representada por essas funções possui orientação horizontal (um eixo entre as orelhas, paralelo ao plano  $XY$  do modelo da sala) e está sempre “olhando” para a primeira fonte sonora definida pelo usuário. Também assume-se que o eixo  $Z$  é vertical para cima, para estabelecer a relação esquerda-direita. Dessa forma, para fazer a rotação da cabeça do ouvinte para diferentes direções, recomenda-se definir a primeira fonte sonora somente como uma referência de posição, ou seja, sem potência considerável, e utilizá-la exclusivamente para alterar as posições entre um caso e outro.

### **6.3.3. Auralização**

Trata-se do pós-processamento biaural através da operação de convolução, que permite a geração de dados audíveis de fontes sonoras no contexto da situação acústica que foi simulada. Os resultados dos cálculos incluem também os ecogramas/histogramas registrados no receptor, permitindo a análise mais detalhada da propagação do som, no domínio do tempo e da frequência.

Finalmente, através da escuta dos resultados audíveis da convolução da fonte sonora com a resposta impulsiva biaural calculada, é possível a avaliação subjetiva para uma análise acústica mais completa.

### **6.3.4. Interface gráfica**

Para a visualização do modelo geométrico, a interface gráfica do programa permite a rotação e aproximação das vistas. Também é possível evidenciar partes do modelo, ou agrupar elementos em camadas, para facilitar o trabalho com materiais de revestimento. A seguir é apresentada na Figura 6.1 uma vista da sala simulada, através do programa RAYNOISE.

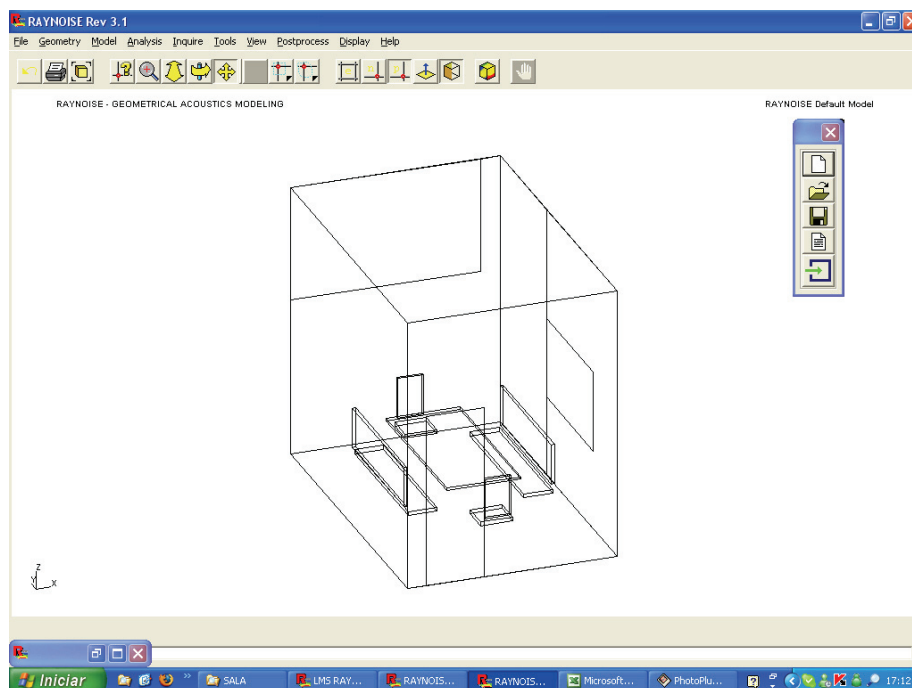


Figura 6.1 – Vista do modelo geométrico da sala no programa RAYNOISE.

#### 6.4. O programa MÓDULOS

O programa tem como plataforma o MS-DOS e foi desenvolvido em linguagem C [GOMES, 2007]. A estrutura do programa não apresenta restrições quanto ao número de superfícies usadas para descrever o espaço, mas a complexidade da sala é sempre limitada pela memória e configuração de *hardware* disponível, sem mencionar o tempo gasto na simulação. O nível de detalhe dado ao modelo deve sempre estar relacionado à faixa de frequência considerada e à percepção das diferenças no resultado, por isso a importância de ouvir o resultado final e comparar com uma referência.

Três módulos independentes compõem o programa, sendo dois para gerar a resposta impulsiva biaural por métodos diferentes e o último para fazer a convolução de um som anecóico com o resultado de cada um dos módulos anteriores.

O Módulo de Fontes Virtuais utiliza o método (FV), já exposto no Capítulo 3, para gerar a resposta impulsiva biaural entre a fonte sonora e o ouvinte em um ambiente. Os dados de entrada são organizados em um arquivo de texto, contendo a geometria da sala, coeficientes de absorção sonora de cada superfície, posição e energia da fonte sonora, posição do ouvinte, ordem das reflexões, distância máxima de uma fonte virtual, velocidade do som, constante de atenuação no ar e frequência de amostragem. Para mais detalhes sobre a configuração dos parâmetros de entrada deste módulo, consultar o manual do programa [GOMES, 2006].

No módulo que utiliza o Método Traçado de Raios, os dados de entrada apresentam algumas diferenças. É necessário determinar o número de raios, o diâmetro do receptor e coeficiente de espalhamento ou difusão para cada superfície. A difusão ou reflexão difusa é um modelo utilizado para representar a reflexão numa superfície irregular, sendo a direção da dispersão das ondas refletidas independente do ângulo de incidência [HENRIQUE, 2002]. O coeficiente de espalhamento pode assumir valores entre 0, nenhuma difusão, reflexão puramente especular, e 1, total espalhamento, com intensidade sonora distribuída uniformemente em todas as direções. Como esse é um dado complexo que não está sendo avaliado neste trabalho, foi usado o valor de 0,1 para o coeficiente de espalhamento (difusão) de todas as superfícies, em todas as simulações. Este valor foi sugerido pelos desenvolvedores do programa.

A resposta impulsiva binaural é registrada em um arquivo de texto que contém além do histórico de todos os raios que atingiram o receptor, suas respectivas direções. Esse arquivo é dado de entrada para o terceiro módulo, que faz a convolução da resposta impulsiva binaural com o banco de dados de HRTFs. Essa etapa é mais rápida do que a construção da resposta impulsiva binaural, pois consiste em apenas duas operações de convolução, para ambos os canais.

O módulo de convolução da resposta impulsiva binaural da sala com o som anecóico solicita inicialmente que o usuário entre com o ângulo (em graus) do observador em relação ao eixo  $x$ . O programa lê o arquivo texto de Fontes Virtuais ou Traçado de Raios, transforma as coordenadas cartesianas para coordenadas polares e acessa o banco de HRTFs escolhido. Nesse ponto é necessário escolher o primeiro método de convolução (direto, direto esperso, FFTW ou FFTP). Então é feito o cálculo de convolução binaural para se obter a resposta impulsiva binaural. Deve-se escolher, então, o segundo método de convolução (direto, FFTW ou FFTP) e, em seguida, fornecer o endereço (pasta e nome) do som anecóico a ser utilizado. O programa abre o som anecóico e o convolve com a resposta impulsiva binaural, obtendo os dados finais para os canais esquerdo e direito. Finalmente, o programa grava o arquivo final em formato *.wav*.

O banco de dados de funções de transferência relacionados à cabeça, HRTFs, usado nesta etapa do trabalho foi cedido gentilmente pelo Prof. Dr. Michael Vorländer, do *Institut für Technische Akustik* da Universidade de Aachen, na Alemanha. O banco contém informações para 936 direções.

Antes da utilização deste banco, usou-se um outro banco de dados, público, desenvolvido pelo *Media Lab* do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) [KEMAR]. Os resultados não se apresentaram satisfatórios, pois as funções de transferência, que deveriam

ser aplicadas para dar apenas a sensação de espacialidade, causavam no sinal de áudio uma alteração espectral significativa, fazendo o resultado soar muito diferente do esperado. A mudança de banco de dados resolveu o problema. Deve-se ressaltar que se é feita a simulação considerando um banco de dados de funções de transferência relacionadas à cabeça, HRTFs, e se faz a gravação de referência com outro, por exemplo, as HRTFs do manequim usado, e os dois não são iguais, fica difícil fazer a comparação, visto que as HRTFs apresentam diferenças espectrais.

Uma limitação dos módulos de simulação do programa ainda é o formato de entrada dos dados dos coeficientes de absorção sonora das superfícies internas. Cada arquivo texto de entrada apenas permite um valor de coeficiente de absorção por superfície, ou seja, só é possível inserir os dados de uma banda de frequência por vez. Os resultados para cada banda de frequência precisam então ser combinados no final para que se obtenha a simulação completa. Esta e outras melhorias estão sendo implantadas aos poucos no programa e estarão habilitadas nas próximas versões.

## 6.5. Sala de reuniões do LVA

O ambiente estudado foi uma sala de reuniões, localizada no terceiro andar do edifício do Laboratório de Vibrações e Acústica. O laboratório é parte do Centro Tecnológico (CTC) do campus da Universidade Federal de Santa Catarina. A vista isométrica da sala é apresentada na Figura 6.2.

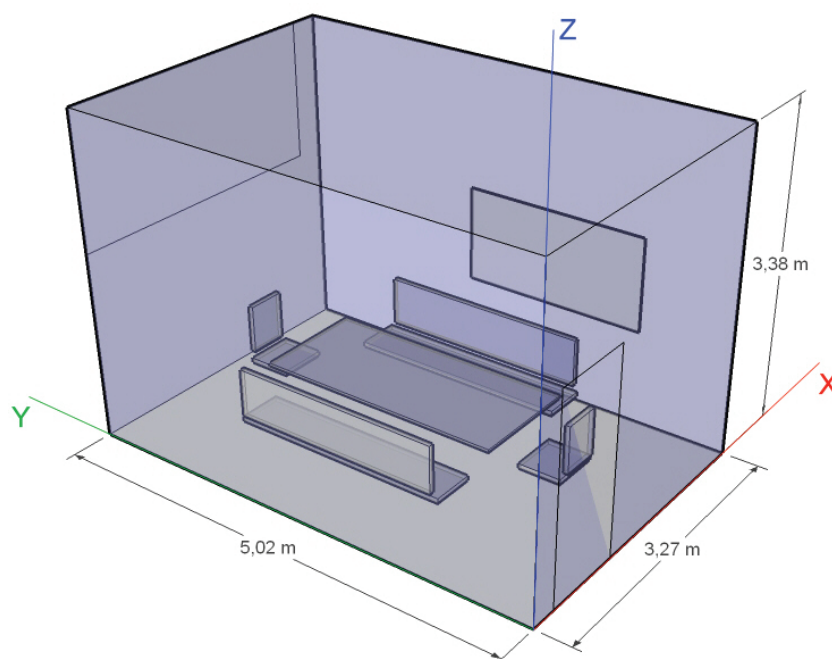


Figura 6.2 - Ilustração da sala de reuniões no LVA-UFSC.



O ambiente foi modelado utilizando-se 93 pontos, 64 superfícies e 10 diferentes materiais. Os materiais utilizados são descritos na Tabela 6.1. As listagens completas das coordenadas das superfícies e dos materiais utilizados no RAYNOISE encontram-se nos Apêndices B e C.

Tabela 6.1 - Coeficientes de absorção usados na simulação computacional, em bandas de 1/1 oitava.

nº	Elemento	Material	Frequência central de banda de oitava							
			63* Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1k Hz	2k Hz	4k Hz	8k* Hz
1	Parede (2)	alvenaria Pintada	0,01	0,01	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02
2	Parede (2)	gesso Pintado	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
3	Teto	concreto	0,03	0,04	0,05	0,06	0,06	0,07	0,09	0,09
4	Piso	cerâmica	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
5	Quadro Branco	PVC	0,28	0,28	0,22	0,17	0,09	0,10	0,11	0,11
6	Mesa	madeira (grande espaço embaixo)	0,40	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10	0,10
7	Porta	madeira	0,14	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10	0,10
8	Janela	vidro (3mm de espessura)	0,07	0,08	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
9	Cadeiras	assento (bem acolchoado)	0,44	0,44	0,60	0,77	0,89	0,82	0,70	0,70
10	Cadeiras (costas)	acolchoado coberto por couro	0,40	0,40	0,50	0,58	0,61	0,58	0,50	0,50

\* não foram encontrados nas tabelas disponíveis da literatura os valores correspondentes às bandas de frequência de 63 e 8000 Hz. Como a interface do programa RAYNOISE não aceita que os valores fiquem em branco, foi repetido o valor da banda de frequências vizinha. Logo, estes valores não têm representatividade.

Para o propósito da simulação, a geometria do ambiente e de seus componentes internos foi simplificada, sendo desconsiderados alguns elementos constitutivos. Por exemplo, a mesa central foi modelada sem os pés, assim como as cadeiras, que foram simplificadas pela associação de seus encostos e assentos em áreas conjuntas.

O volume total da sala é de 55,5 m<sup>3</sup> (5,02 x 3,38 x 3,27 m<sup>3</sup>) e o tempo de reverberação em média estimado (através de Sabine - Capítulo 3, item 3.3) para a sala é de 0,8 segundos. Com base nesses dados é possível calcular a frequência a partir da qual os métodos geométricos de simulação fornecem boas aproximações. Isso ocorre quando a densidade modal é alta o suficiente para que os modos possam ser considerados sobrepostos. Tal frequência é calculada de acordo com a Equação (6.1) [KUTTRUFF, 1991]:

$$f > 2000 \sqrt{\frac{T_{60}}{V}} \quad (6.1)$$

sendo  $T_{60}$  o Tempo de Reverberação (estimado) em segundos e  $V$  o volume da sala em  $m^3$ .

O cálculo indica a frequência aproximada de 240 Hz. Isso significa, por exemplo, que as simulações feitas para 125 Hz não devem ser consideradas, pois é uma banda situada abaixo do limiar de transição, a partir do qual os resultados têm validade.

## 6.6. Posições de fonte e receptor

Tomando a origem do eixo de coordenadas o canto inferior direito representado na Figura 5.6, as diferentes configurações avaliadas na simulação de duas diferentes fontes sonoras são ilustradas pela vista superior nas figuras 6.3, 6.4 e 6.5 e as suas coordenadas são apresentadas na Tabela 6.2.

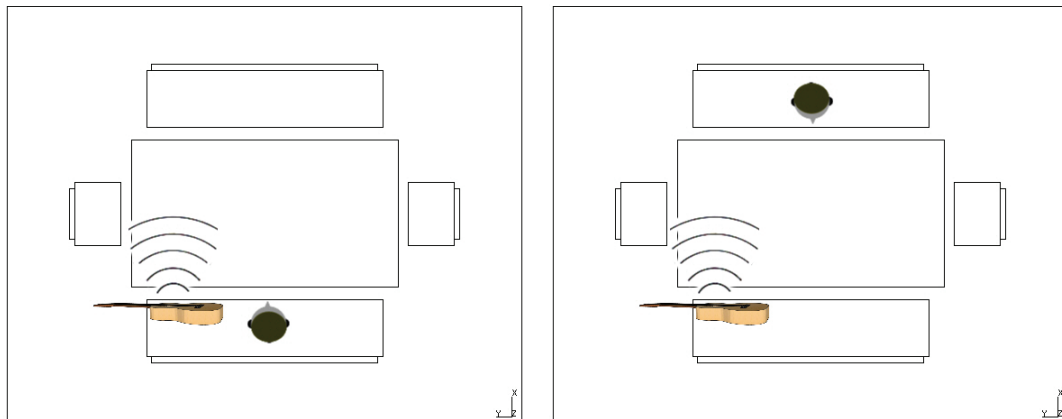


Figura 6.3 - Vista superior das posições de fonte e receptor para o violão.

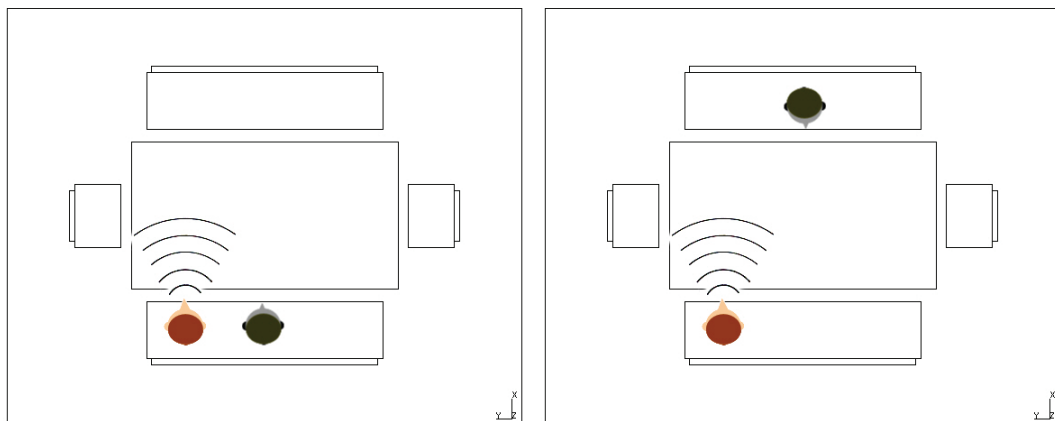


Figura 6.4 - Vista superior das posições de fonte e receptor para a voz.

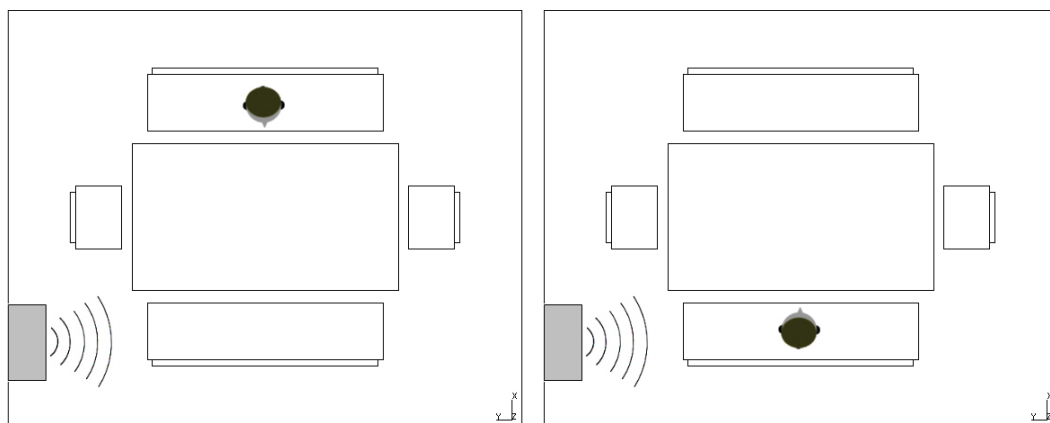


Figura 6.5 - Vista superior das posições de fonte e receptor para o aparelho de ar-condicionado.

Tabela 6.2 - Coordenadas cartesianas em metros das posições de fonte e receptor.

Configuração	Fonte	Fonte			Receptor		
		x	y	z	x	y	z
1	Violão	0,74	3,41	0,8	0,74	2,51	1,0
2	Violão	0,74	3,41	0,8	2,54	2,51	1,0
3	Voz	0,74	3,41	1,0	0,74	2,51	1,0
4	Voz	0,74	3,41	1,0	2,54	2,51	1,0
5	Ar-cond.	0,54	4,9	2,5	0,74	2,51	1,0
6	Ar-cond.	0,54	4,9	2,5	2,54	2,51	1,0

## 6.7. Considerações sobre o aparelho de ar-condicionado

As comparações entre os resultados das simulações foram feitas por meio de comparações subjetivas, e serão detalhadas no Capítulo 7, item 7.1. Cabe lembrar que não houve instalação física do aparelho de ar-condicionado na sala de reuniões, e sim uma simulação do ruído através de uma fonte eletroacústica omnidirecional. As gravações binaurais desse ruído foram então aplicadas como referência na análise objetiva das comparações com os resultados da auralização do ar condicionado. Apenas os sons da voz e do violão foram utilizados na comparação subjetiva. Os métodos usados para a validação da simulação do ruído do aparelho de ar-condicionado foram outros e estão descritos no Capítulo 5, item 5.4. Os resultados se encontram no Capítulo 7, item 7.2.

## CAPÍTULO 7

### ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo está dividido em duas partes. Inicialmente é apresentada a metodologia utilizada para a avaliação subjetiva dos resultados dos diferentes métodos de auralização para voz e violão. Depois são apresentados os resultados das comparações objetivas relativas à auralização do ruído do ar-condicionado, baseadas na análise espectral. Cada resultado é comentado em paralelo à sua exposição.

#### 7.1. Análise subjetiva

A qualidade dos resultados de cada um dos métodos de auralização foi avaliada por meio de um procedimento de avaliação subjetiva. A técnica escolhida foi a comparação dos resultados da auralização com a gravação biauricular de referência, utilizando como instrumento psicométrico uma escala em linha, apresentada na Figura 7.1, conforme proposto por LEITE e PAUL (2006). O participante, após escutar a referência e cada som gerado por um dos três métodos, deveria posicionar na escala os sons em relação à referência.

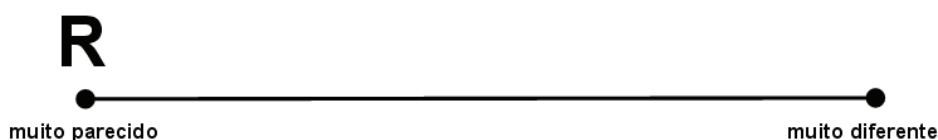


Figura 7.1 – Escala de linha para ordenamento dos sons em relação à referência (R).

Foi utilizada uma combinação de questionário em papel (apresentado no Apêndice G) com uma interface de computador (presente no CD que acompanha este trabalho). A interface de computador proporcionou ao ouvinte um treinamento de uso da escala bem como interfaces de demonstração do arranjo espacial e as devidas interfaces para reproduzir os sons (referência e três sons de auralização). Assim, o ensaio era administrado pelo próprio participante, proporcionando o tempo necessário para realização da tarefa para cada participante.

Inicialmente foi realizado um pré-teste com 10 pessoas convidadas, a fim de testar o procedimento de avaliação, interface e questionário, e sugerir melhorias. Nesse os sons eram comparadas à referência de forma geral, sem estipular uma dimensão de percepção. Terminada a avaliação, os participantes sugeriram a separação da tarefa em etapas, onde o ouvinte daria atenção a uma dimensão de cada vez.

Para os ensaios, o procedimento foi alterado, fazendo com que os participantes avaliassem os conceitos *localização da fonte*, *reverberação* e *timbre* separadamente para cada fonte. Estes parâmetros estão descritos no Capítulo 3, item 3.3. O significado dos parâmetros foi explicado por meio da interface de computador, utilizando-se exemplos sonoros, arquivos de áudio. Logo em seguida, eram feitas as avaliações referentes ao conceito explicado.

Os sons foram representados pelas letras A, B e C, a fim de não induzir nenhuma resposta. As letras A, B e C significam, respectivamente, o Método das Fontes Virtuais (FV), Método Híbrido de Traçado de Pirâmide utilizado pelo RAYNOISE (RN) e Método do Traçado de Raios (TR). Depois de marcados os três sons, a linha ficaria conforme o exemplo ilustrado pela Figura 7.2.



Figura 7.2 – Exemplo do resultado do ensaio subjetivo, com o ordenamento dos sons em relação à referência (R) marcado na escala de linha.

Nos ensaios participaram 35 pessoas, estudantes de graduação ou pós-graduação de diversos cursos da Universidade Federal de Santa Catarina, sendo que dez deles possuem alguma experiência em acústica. Cada pessoa fez 12 comparações, divididas em três grupos, um para cada parâmetro. Em cada grupo, metade dos casos tinha como referência a gravação binaural da voz e a outra metade a gravação binaural do violão. No total foram obtidas 420 comparações.

#### 7.1.1. Análise dos resultados

A análise dos resultados foi feita de duas formas, considerando os diferentes tipos de dados obtidos: ordinais, que consideram somente a ordem em que os sons aparecem em relação à semelhança com a referência; intervalares, que consideram as distâncias exatas entre os sons marcados na linha.

Para a aplicação dos métodos estatísticos chamados paramétricos é necessário que a distribuição dos resultados da população (da qual se tirou a amostra) obedeça à curva normal de distribuição estatística. O método ANOVA é um exemplo bastante conhecido desse tipo de teste. Já nos testes não-paramétricos essas suposições não são necessárias, fazendo com que se adaptem melhor aos dados provenientes de opiniões subjetivas. Para maior esclarecimento ou

aprofundamento dos conceitos e métodos estatísticos usados neste trabalho, sugere-se consultar SIEGEL (1975) ou HOWELL (1992).

Uma análise exploratória [TUKEY, 1977], utilizando diagramas em caixa, permitiu identificar valores discrepantes. Como se trata de uma avaliação subjetiva de sons por meio de conceitos novos para a maioria dos participantes, optou-se por não considerar na análise dos dados os valores discrepantes univariantes identificados através dos diagramas em caixa.

As comparações 1, 3 e 4 de *localização* do ouvinte 8, as comparações 1, 2 e 5 de *localização* do ouvinte 11 e a comparação 6 de *reverberação* do ouvinte 15 foram retiradas da amostra por apresentarem valores discrepantes univariantes. Acredita-se que essas pessoas tiveram dificuldades de avaliação para esses casos. Foram retiradas, no total, sete comparações, das 420 consideradas inicialmente. Isso representa 1,67% dos dados, valor baixo e aceitável.

### 7.1.2. Dados ordinais

Os dados ordinais deram origem aos gráficos de colunas empilhadas, que mostram a frequência dos postos atribuídos aos métodos. Os códigos FV, RN e TR representam respectivamente os métodos de Fontes Virtuais, Híbrido de Traçado de Pirâmides (RAYNOISE) e Traçado de Raios. As Figuras 7.3 a 7.8 apresentam os resultados dos dados ordinais para os três parâmetros, considerando somente uma das fontes, violão ou voz, ou combinando os dados para a análise geral. A parcela representada pelo número 1 na coluna de um método refere-se à porcentagem de pessoas que julgou que tal método é o mais parecido com a referência, enquanto a legenda 2 indica a porcentagem de pessoas que o classificou como segundo lugar e assim por diante.

#### ▪ Localização:

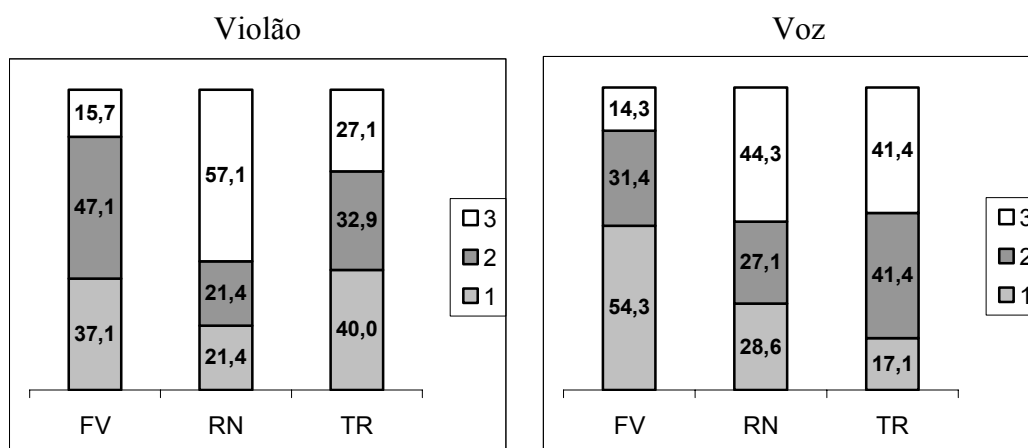


Figura 7.3 – Resultado da análise dos resultados dos dados ordinais para o critério *localização* do violão e da voz.

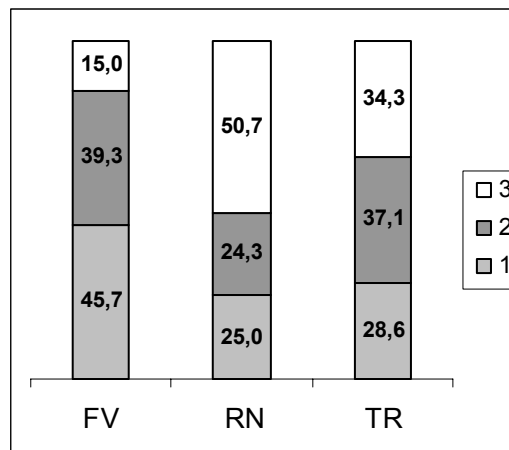


Figura 7.4 – Resultado da análise geral dos resultados dos dados ordinais para o parâmetro *localização*.

Analisando as classificações conforme as Figuras 7.3 e 7.4, é possível tirar as seguintes conclusões: o método FV (Fontes Virtuais) aparece como primeiro colocado no quesito *localização* para a voz enquanto que o método TR (Traçado de Raios) vence no quesito *localização* para a fonte violão. Isso demonstra que o tipo de fonte sonora influi na percepção desse parâmetro, apesar das diferenças não serem muito grandes. Sem a distinção da fonte, o método de Fontes Virtuais é o melhor classificado pelos participantes.

▪ Reverberação:

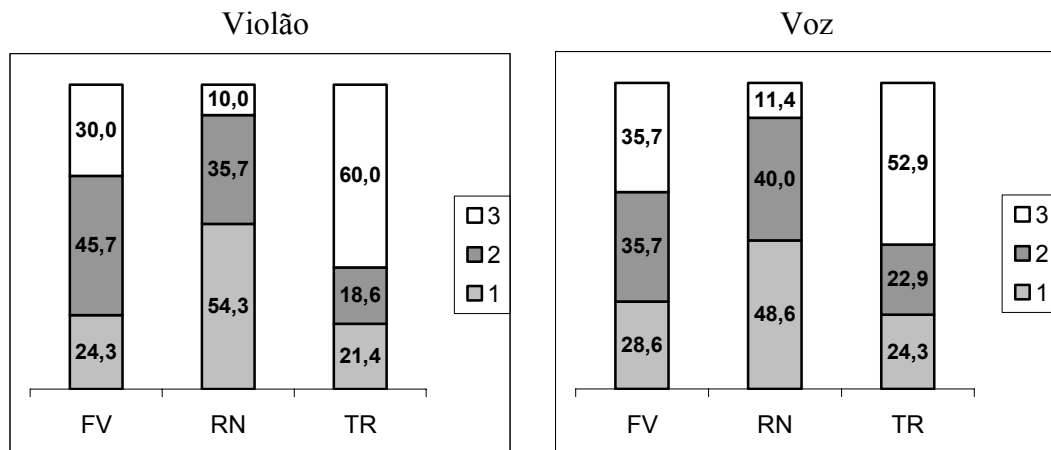


Figura 7.5 – Resultado da análise dos resultados dos dados ordinais para o critério *reverberação* do violão e da voz.

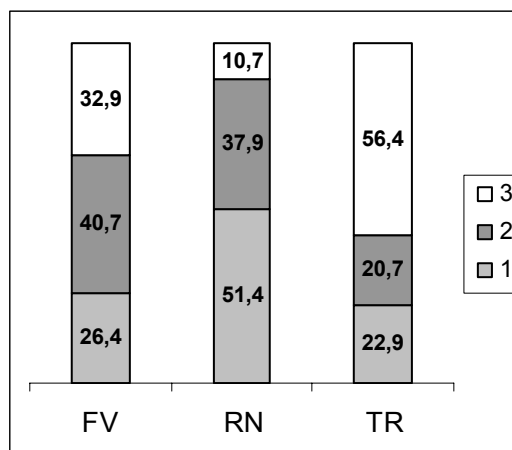


Figura 7.6 – Resultado da análise geral dos resultados dos dados ordinais para o parâmetro *reverberação*.

Em relação à *reverberação*, referente às Figuras 7.5 e 7.6, o melhor método percebido foi o RN (RAYNOISE), independente da fonte.

#### ▪ Timbre

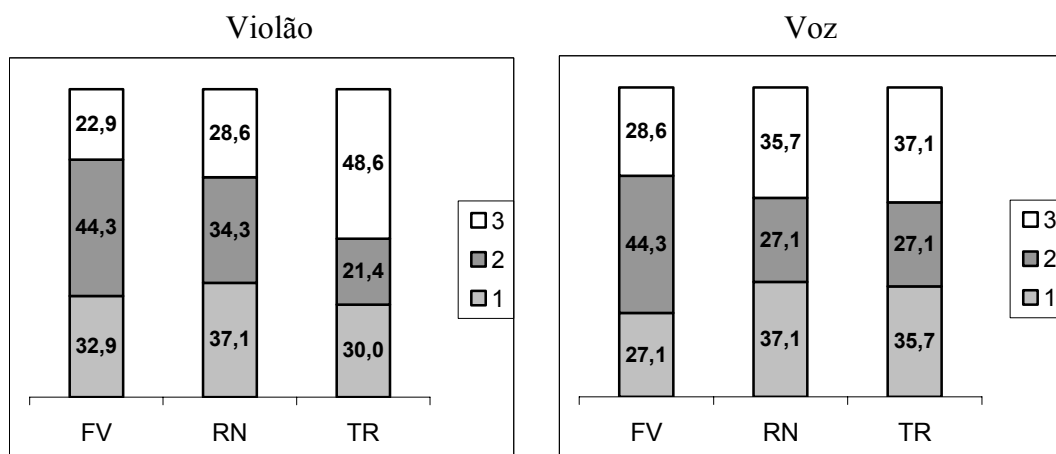


Figura 7.7 – Resultado da análise dos resultados dos dados ordinais para o critério *timbre* do violão e da voz.

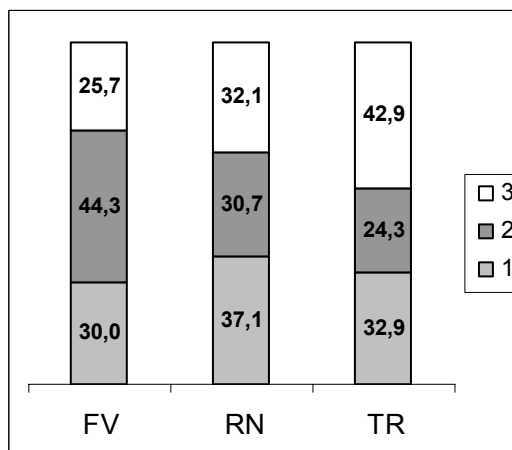


Figura 7.8 – Resultado da análise geral dos resultados dos dados ordinais para o parâmetro *timbre*.



Quanto ao *timbre*, cujos resultados são apresentados nas Figuras 7.7 e 7.8, o método RN foi o melhor classificado, tanto para voz como para violão. Porém, a vantagem diante os outros métodos é muito pequena.

Cabe avaliar se as diferenças notadas entre os métodos são estatisticamente significativas. Para esta etapa, foi utilizado a análise dos postos e o teste de signos de Wilcoxon (*Wilcoxon-Signed Ranks Test*) [WILCOXON, 1945]. Os resultados do teste são apresentados na Tabela 7.1, onde o sinal ✓ indica que as diferenças são significativas ( $p=0,05$ ).

Tabela 7.1 – Verificação de diferenças significativas em dados ordinais.

Parâmetro	Dados	FV e RN	RN e TR	FV e TR
<i>localização</i>	violão	✓	✓	✗
	voz	✓	✗	✓
	geral	✓	✗	✓
<i>reverberação</i>	violão	✓	✓	✗
	voz	✓	✓	✗
	geral	✓	✓	✗
<i>timbre</i>	violão	✗	✗	✗
	voz	✗	✗	✗
	geral	✗	✗	✗

Para a *localização*, não houve diferenças significativas entre FV e TR para o violão, nem entre RN e TR para a voz e para a classificação geral. Sendo assim, podemos apresentar os resultados de forma mais clara através do podium representado pela Figura 7.9. Não há terceiro lugar.

Para a *reverberação*, também não houve diferença significativa entre FV e TR para a disputa do segundo lugar. Sendo assim, de acordo com o julgamento dos participantes, seria possível classificar o desempenho dos métodos quanto à Reverberação conforme a Figura 7.10.

Entre as classificações dos métodos quanto ao *timbre* não há diferenças estatisticamente significativas.

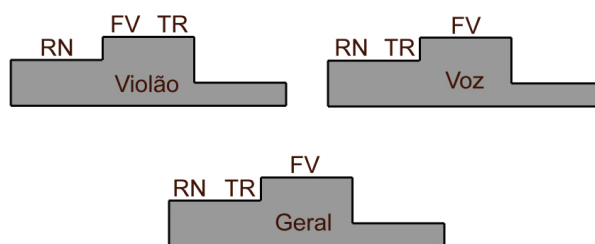


Figura 7.9 – Classificação geral para o parâmetro Localização conforme dados ordinais.

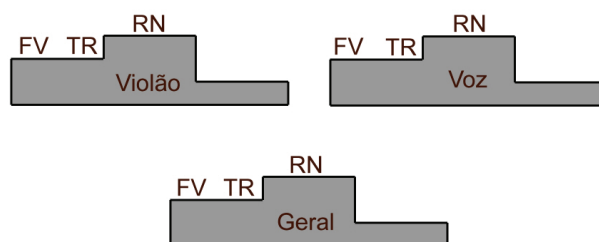


Figura 7.10 – Classificação geral para o parâmetro Reverberação conforme dados ordinais.

Para confirmar os resultados da análise dos dados ordinais e para tentar chegar a uma conclusão mais expressiva sobre a dimensão *timbre*, foi feita então a análise dos dados intervalares, como segue.

### 7.1.3. Dados intervalares

Os dados intervalares deram origem aos histogramas<sup>6</sup>. Pela análise dos histogramas obtidos, conclui-se que os dados não seguem a distribuição normal. A Figura 7.11 demonstra um caso em que a distribuição se apresentou mais próxima da função normal, isto representa a minoria dos dados. A maior parte dos dados tem uma distribuição bastante diferente da normal, como exemplifica o resultado apresentado na Figura 7.12. O Apêndice D contém a listagem completa dos histogramas gerados a partir dos dados intervalares.

<sup>6</sup> Na estatística, um histograma é uma representação gráfica da distribuição de freqüências de uma massa de dados medidos, normalmente um gráfico de barras verticais, em que a base de cada uma delas corresponde ao intervalo de classe e a sua altura à respectiva freqüência. A construção de histogramas é um importante indicador da distribuição de dados, pois pode indicar se uma distribuição aproxima-se de uma função normal, representadas pela linha escura mais forte.

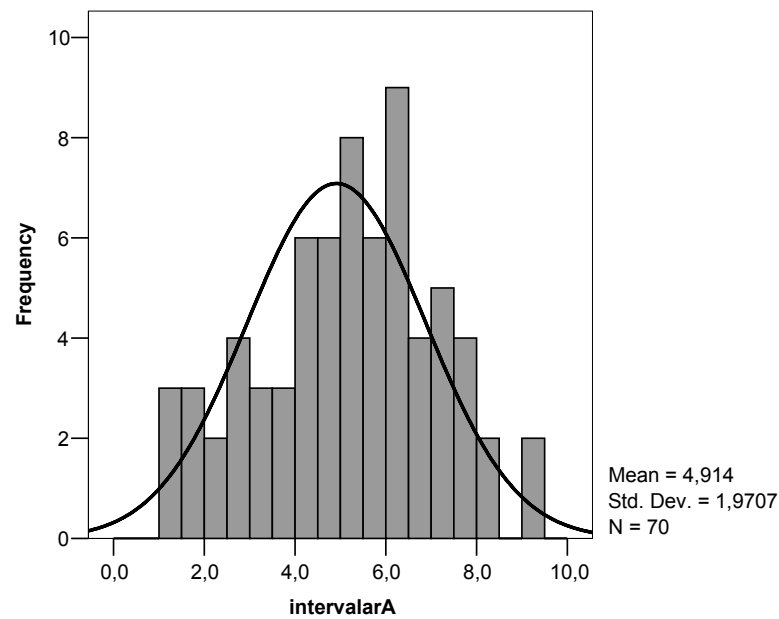


Figura 7.11 - Histograma para o parâmetro Reverberação da fonte voz - Método FV.

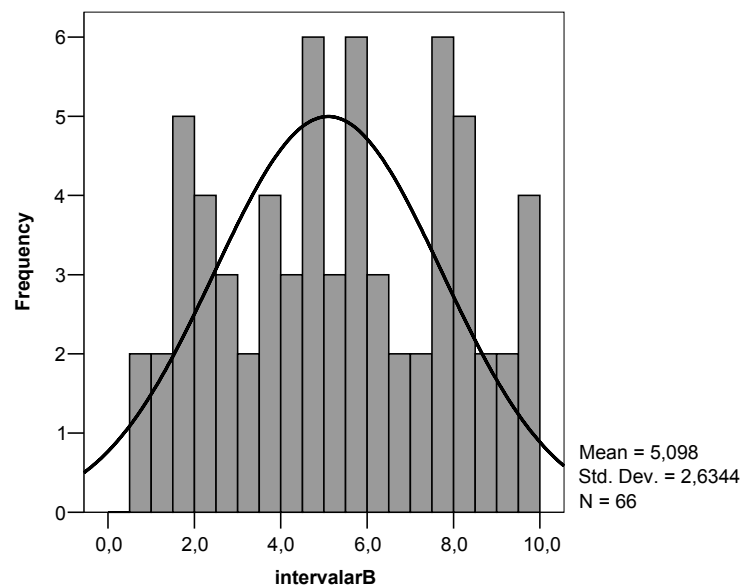


Figura 7.12 - Histograma para o parâmetro Localização da fonte violão - Método RN.

Devido à não-normalidade na distribuição dos dados intervalares, as medianas foram calculadas e comparadas, ao invés das médias, como parâmetros de localização das distribuições. Na Tabela 7.2, quanto menor o valor da mediana, mais próximo da referência o método foi classificado e melhor é o seu resultado.

Tabela 7.2 – Medianas obtidas das distribuições de dados para os três parâmetros.

Parâmetro	Dados	FV	RN	TR
localização	violão	2,5	5	2,0
	voz	2,5	4,5	4,5
	geral	2,5	5	3,5
reverberação	violão	3,25	2	5
	voz	5	4	6
	geral	4,5	3	5,5
timbre	violão	4	3	4,25
	voz	5	4,5	4,5
	geral	4,25	3,5	4,5

Antes de estabelecer um ranking baseado nas medianas, é preciso testar se há diferenças significativas entre elas. Para tal, foram executadas as provas de Friedman e a prova de Kendall-W [SIEGEL, 1975][HOWELL, 1992], considerando um nível de significância de  $p=0,05$ . Os resultados são apresentados na Tabela 7.3, onde o sinal ✓ indica que as diferenças são significativas ( $p=0,05$ ). As aspas em “✓” têm o propósito de destacar os resultados que sofreram mudança em relação à Tabela 7.1, em virtude da nova análise.

Tabela 7.3 – Verificação de diferenças significativas em dados intervalares.

Parâmetro	Dados	FV e RN	RN e TR	FV e TR
localização	violão	✓	✓	“✓”
	voz	✓	✗	✓
	geral	✓	✗	✓
reverberação	violão	✓	✓	✗
	voz	✓	✓	✗
	geral	✓	✓	“✓”
timbre	violão	✗	✗	✗
	voz	✗	✗	✗
	geral	✗	✗	✗

Conclui-se que existe diferença significativa entre a avaliação dos métodos FV e TR para a localização do violão, o que não foi possível afirmar utilizando-se apenas os dados ordinais. O mesmo aconteceu com as diferenças entre FV e TR para o parâmetro Reverberação. A reclassificação para esses dois parâmetros é apresentada pelas Figuras 7.13 e 7.14.

No entanto, os sujeitos afirmaram que o ordenamento dos sons é bem mais fácil que a atribuição de distâncias, o que resulta em dados ordinais talvez mais confiáveis que os dados intervalares. O estudo dos dados intervalares não trouxe informações adicionais sobre a classificação para o Timbre.

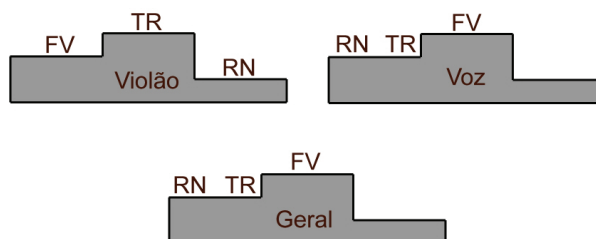


Figura 7.13 – Reclassificação para o parâmetro Localização em função da análise dos dados intervalares.

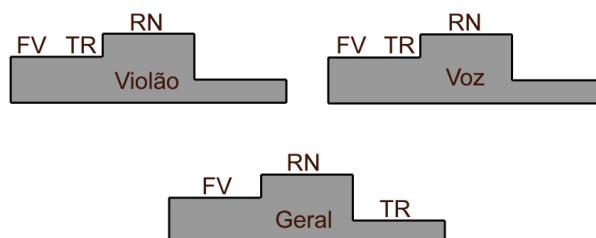


Figura 7.14 – Reclassificação para o parâmetro Reverberação em função da análise dos dados intervalares.

#### 7.1.4. Comentários feitos pelos participantes

Após a finalização do questionário, cada participante foi solicitado a comentar sobre as dificuldades de avaliação e compreensão dos conceitos envolvidos. Os comentários eram anotados no verso do formulário de resposta. Aqueles considerados mais significativos são transcritos a seguir:

*“O timbre é mais difícil, pois a sua comparação é baseada em parâmetros menos óbvios e de difícil memorização”.*

*“Um efeito influi no outro, então fica difícil prestar atenção em uma coisa de cada vez”.*

*“Ótimo questionário. Só achei difícil achar diferenças nos exemplos de reverberação”.*

*“Difícil distinguir reverberação para o violão”.*

*“É mais fácil distinguir timbre para voz”.*

*“Como eu ouvi primeiro a localização e as fontes continuaram a mudar de posição, a impressão da localização ficou na memória e incomodou um pouco na avaliação dos outros testes”.*

*“Por exemplo, quando o parâmetro é Localização, a gente tem que focar somente na localização, não é? Porque me parece que outros aspectos mudam também”.*

Sendo assim, fica claro que a elaboração de questionários para as avaliações subjetivas dos resultados dos algoritmos de auralização precisa de mais estudo. A opinião geral dos participantes leigos em acústica revelou, principalmente, dificuldades em se avaliar uma característica do som enquanto outras características também variam. No entanto, a tentativa de avaliar todos os parâmetros em conjunto, como foi feito nos pré-testes, mostrou-se também inadequado.

## **7.2. Análise objetiva**

Para a análise objetiva dos resultados, escolheu-se, entre as três fontes possíveis, o aparelho de ar-condicionado por produzir um ruído estacionário (vide espectrogramas no Apêndice E), evitando-se, assim, a variabilidade no tempo como parâmetro a ser considerado. Além disso, o fato do som do aparelho ar-condicionado ser um ruído de banda larga<sup>7</sup> permitiu avaliar o comportamento dos algoritmos em praticamente toda a faixa de frequência audível. Os sinais provenientes dos diferentes algoritmos de simulação e a gravação binaural foram analisados. Cada sinal foi analisado por meio de FFT, para avaliar o efeito das simulações no espectro dos resultados, em relação à gravação de referência. Aproveitou-se, também, para ouvir os sons e validar se os efeitos notados nos gráficos comparativos se correlacionavam com as diferenças notadas através da audição. Como a dimensão avaliada nesta etapa é o “timbre”, relacionado à composição espectral, e não mais a “localização”, apenas foi considerada uma das duas configurações simuladas, apresentadas no Capítulo 6, item 6.6. A segunda configuração da Figura 6.5 ilustra as posições de fonte e receptor adotadas nesta análise e as Figuras 7.15 e 7.16 apresentam as comparações das FFTs para os canais esquerdo e direito, respectivamente, pois cada sinal binaural é sempre composto de dois canais.

Na legenda dos gráficos de FFT, “Gravação” significa o som anecóico reproduzido através de uma fonte eletroacústica omnidirecional (dentro da sala real, na exata posição onde é instalado em uma situação normal) e gravado através de tecnologia binaural; “Simulação” significa o som anecóico convoluído com o resultado da modelagem acústica da sala simulada, proveniente de um dos três métodos estudados. Além disso, é importante informar

---

<sup>7</sup> Banda larga aqui se refere ao fato deste tipo de ruído ser caracterizado pela combinação simultânea e quase homogênea de componentes de muitas frequências, dentro de todo o espectro audível.

que: FV = Método de Fontes Virtuais (MÓDULOS); RN = Método Híbrido de Traçado de Pirâmides (RAYNOISE) e TR = Método de Traçado de Raios (MÓDULOS).

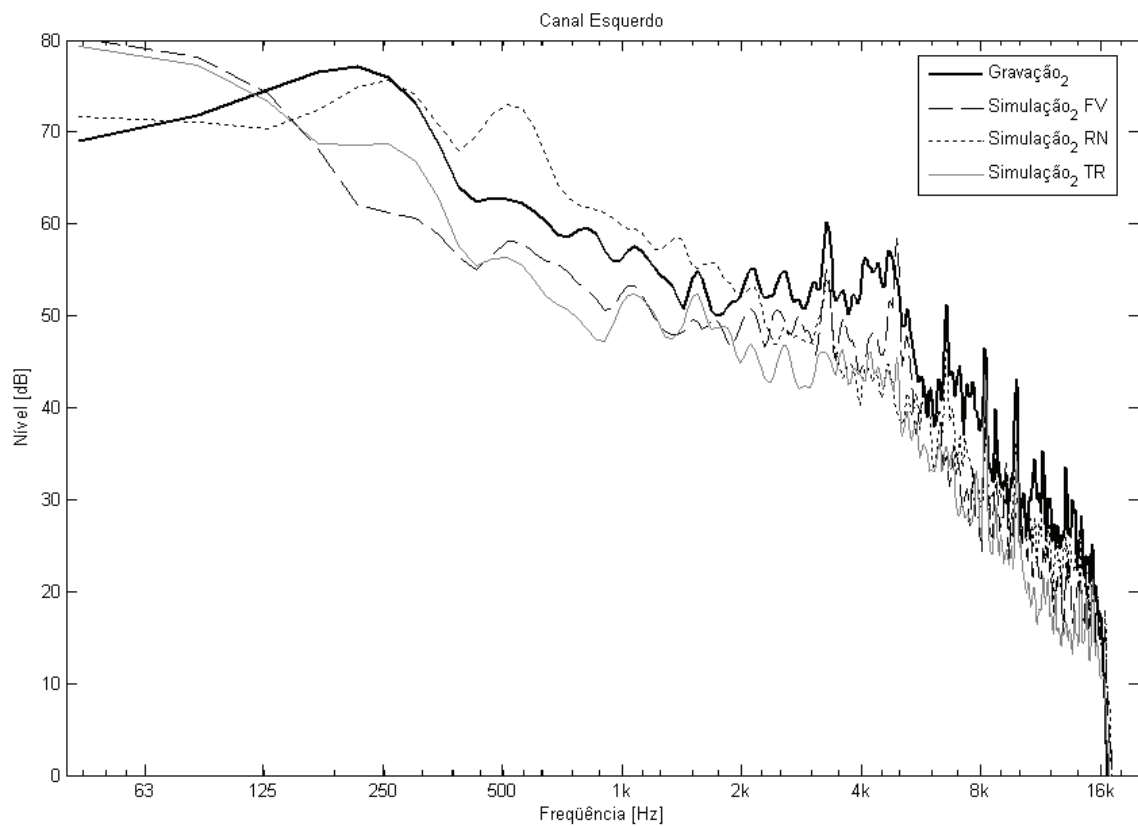


Figura 7.15 - Espectros FFT dos resultados do canal esquerdo das simulações e do som de referência.

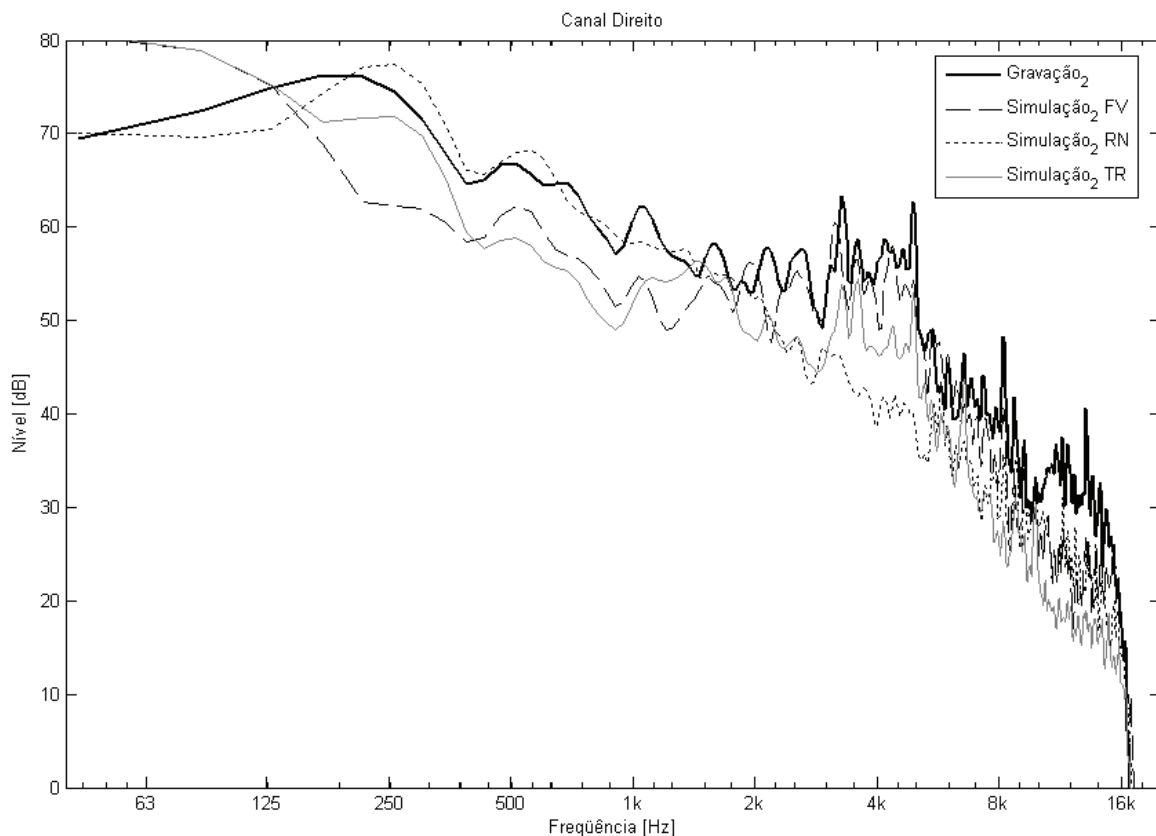


Figura 7.16 - Espectros FFT dos resultados do canal direito das simulações e do som de referência.

A FFT foi escolhida para a análise por ser um algoritmo consagrado e por representar para a maioria dos casos um ponto de partida para indicar outras análises a serem escolhidas. Antes de analisar os resultados da FFT, cabe ressaltar que os resultados de análises simples, tais como a FFT, nem sempre se correlacionam bem com a impressão auditiva, que de forma geral não é linear. Dessa forma, pequenas diferenças no gráfico podem ter grande impacto na audição ou vice-versa. Efeitos psicoacústicos, como o mascaramento em frequência, também não podem ser visualizados através da FFT, embora sejam perceptíveis através da audição. O leitor deste trabalho deve, portanto estar ciente destas limitações e o autor recomenda a escuta das faixas sonoras presentes no CD que se encontra em anexo (relativo ao Apêndice F) para tal análise auditiva. Como a análise se baseia na comparação relativa entre os níveis e as tendências das curvas dos espectros dos resultados, apenas é considerado um canal, o esquerdo, por ser representativo do conjunto de resultados obtidos. O espectro será dividido em três regiões:

- Região A (Figura 7.17) = bandas de 63, 125 e 250 (Hz);
- Região B (Figura 7.18) = bandas de 500, 1k e 2k (Hz);
- Região C (Figura 7.19) = bandas de 4k, 8k e 16k (Hz).



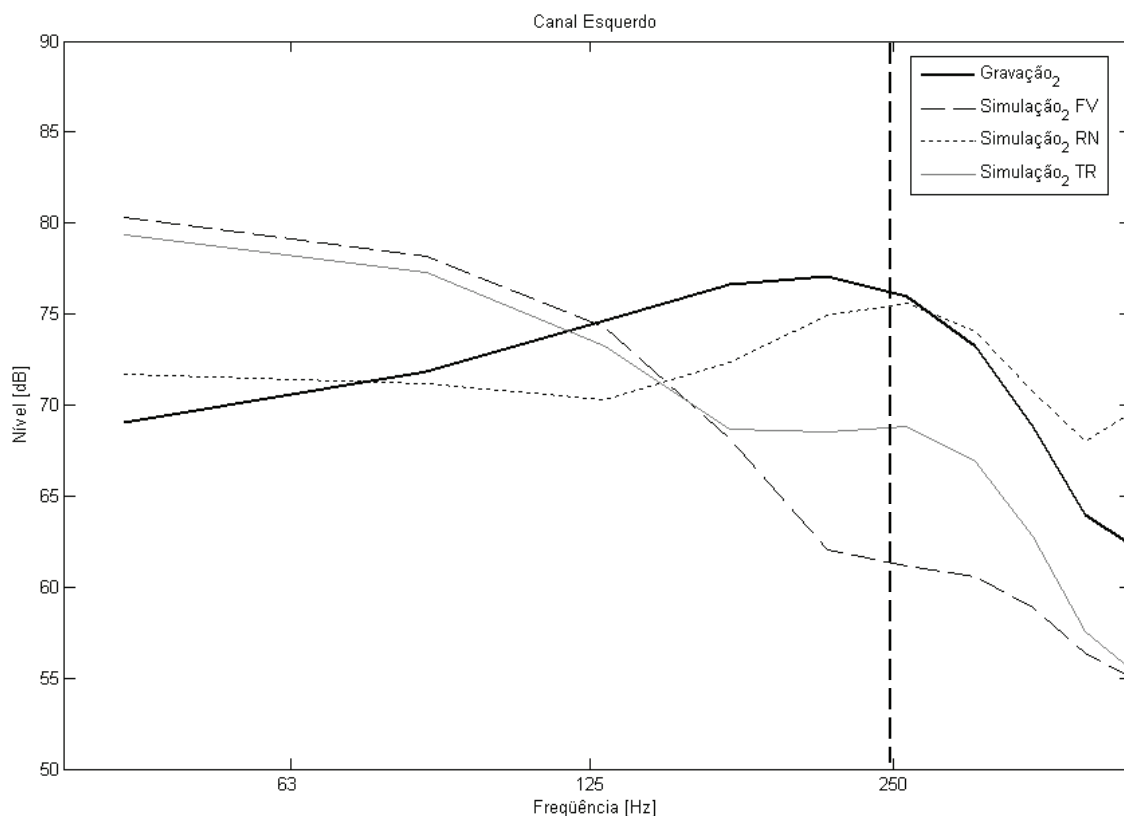


Figura 7.17 - Espectros FFT dos resultados do canal esquerdo das simulações e do som de referência para as bandas de 63, 125 e 250 Hz.

As curvas da Figura 7.17 devem ser consideradas apenas a partir de 250 Hz, conforme a frequência de corte calculada no Capítulo 5, item 5.5, a partir da qual os métodos geométricos de simulação fornecem boas aproximações, pois a densidade modal é alta o suficiente para que os modos possam ser considerados sobrepostos.

Nota-se que os métodos FV e TR do programa MÓDULOS apresentam um nível de 6 a 12 dB abaixo da referência, enquanto o método usado pelo RAYNOISE acompanha a gravação, com 5 dB de diferença máxima. Este fato não se confirma na audição apenas do canal esquerdo dos mesmos sinais, onde a impressão que se tem é que o Método de Traçado de Raios possui mais componentes de baixa frequência do que os outros. Porém convém não confundir nível de pressão sonora medido com o nível percebido, pois o nível de pressão sonora, NPS linear, não é capaz de expressar a percepção do ouvido humano.

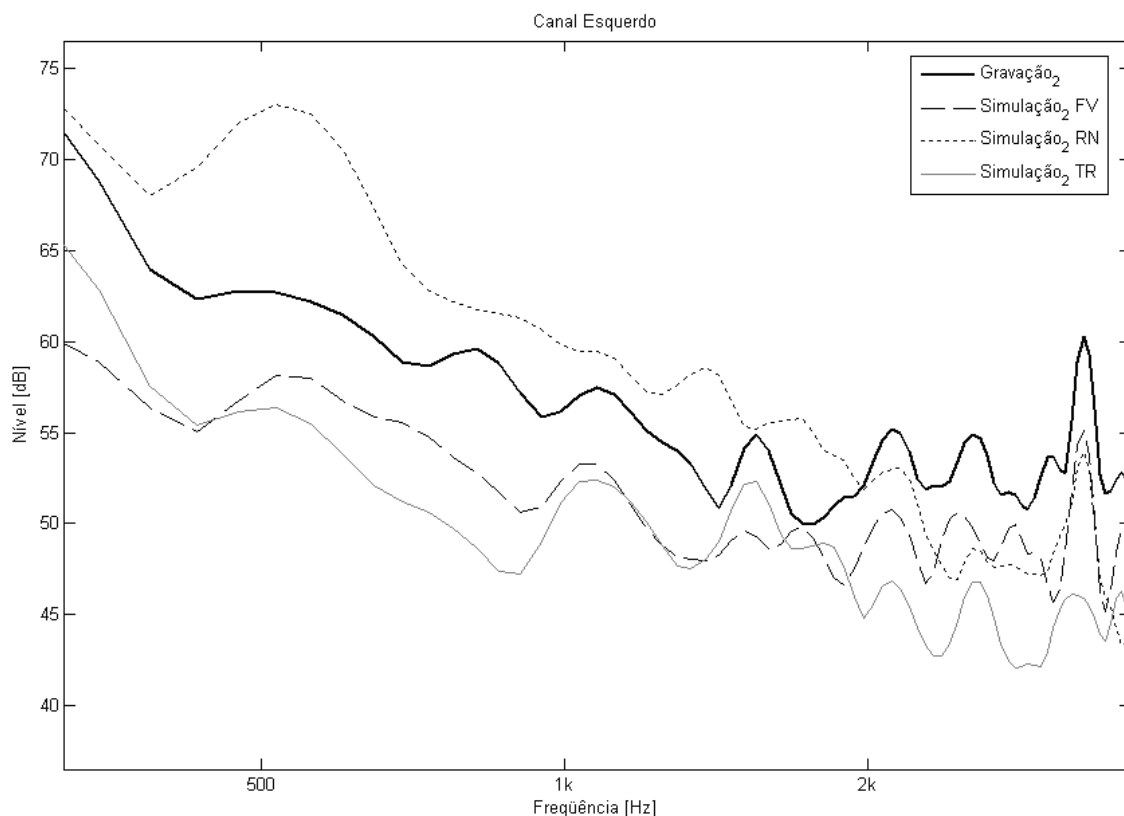


Figura 7.18 - Espectros FFT dos resultados do canal esquerdo das simulações e do som de referência, para as bandas de 500, 1000 e 2000 Hz.

Na região das médias frequências (Figura 7.18) pode-se observar que, na maior parte do espectro, o algoritmo do RAYNOISE estima um valor maior para o nível de pressão sonora, enquanto os valores de NPS estimados pelos algoritmos de MÓDULOS (FV e TR) se encontram abaixo da referência. Como a fonte sonora não foi calibrada em relação aos sinais usados na simulação, a comparação relativa somente entre as simulações é preferível. Porém a diferença nessa região de frequências médias é bastante perceptível na audição, visto que os métodos FV e TR não apresentam de forma clara o ruído associado ao compressor, mas principalmente a componente associada ao fluxo de ar. A componente de ruído atribuída ao compressor é mais “encorpada”, tonal e incômoda, enquanto o ruído causado pelo fluxo de ar consiste mais em um “chiado”, que só começa a incomodar em um nível bem mais alto.

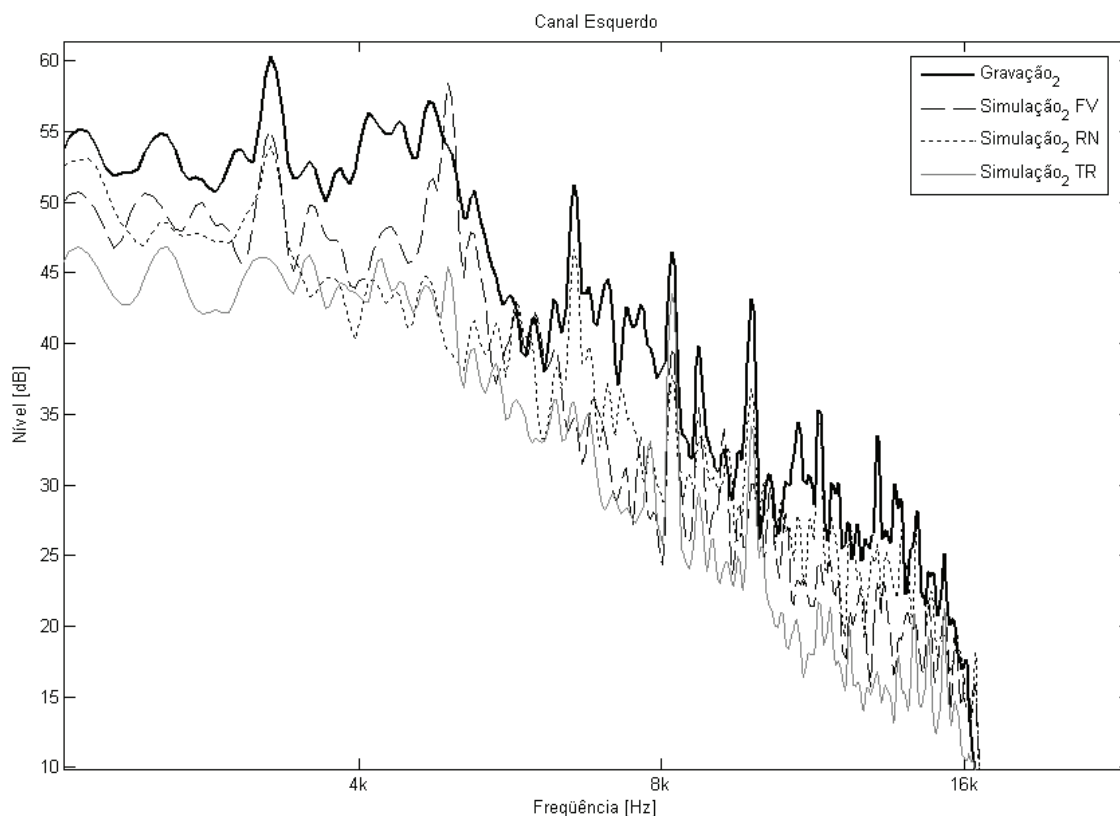


Figura 7.19 - Espectros FFT dos resultados do canal esquerdo das simulações e do som de referência, para as bandas de 4000, 8000 e 16000 Hz.

Em relação às altas frequências, considerando de 4 a 8 kHz, todos os métodos apresentam nível abaixo da referência. No entanto, o que mais se aproxima da gravação é o Método de Fontes Virtuais, que realmente apresenta na escuta uma considerável semelhança em relação à referência nessa faixa de frequências. Comparando o nível de pressão sonora entre os métodos apenas, pela falta de calibração da referência, para esta faixa de frequências, o método FV apresenta o nível mais baixo. Isto se correlaciona com o resultado audível, pois é difícil notar o efeito do ruído proveniente do fluxo de ar em seu resultado.

Cabe ressaltar que não foi feita a equalização dos fones de ouvido para a reprodução dos sons auralizados. Isto pode ter influenciado na percepção auditiva das comparações. Da mesma forma, a resposta em frequência da fonte sonora eletroacústica utilizada para a reprodução do som do ar-condicionado, para a gravação de referência, deve ter influenciado um pouco os resultados da gravação binaural, utilizada como referência.

Outra maneira de se comparar os espectros dos sons em estudo é a representação através de espectrogramas, apresentados no Apêndice E.

Para melhor investigar quais as características psicoacústicas do ruído podem ser relacionadas a determinadas impressões audíveis e obter equações que prevejam o resultado

das avaliações subjetivas a partir dessas características, existe o estudo da Qualidade Sonora [18], que não será abordado neste trabalho.

### 7.3. Comparação do volume perceptível

Para mostrar a importância dos parâmetros psicoacústicos, foi realizado o cálculo de *loudness*. O *loudness* é um modelo psicoacústico que não exprime simplesmente intensidade sonora, mas trata-se de um termo subjetivo que descreve a capacidade da percepção do ouvido humano. Está intimamente relacionado com a intensidade sonora, mas não podem ser considerados equivalentes. A intensidade precisa estar relacionada à sensibilidade auditiva nas frequências específicas contidas no espectro sonoro. Também se deve considerar que a resposta do ouvido para intensidade sonora crescente é uma "potência de dez" ou relação logarítmica. Essa é uma das motivações para usar-se a escala em decibéis ao medir intensidade sonora. Para avaliar o *loudness* de forma mais realística, as curvas de sensibilidade do ouvido são relacionadas para produzir uma escala de *sones* para *loudness*.

Foi calculado o *loudness* conforme ZWICKER e FASTL (1999), somente para as simulações, sem considerar a gravação de referência. Isso se deve ao fato de que, ao fazer a gravação da referência, não foi gravado um sinal de calibração que pudesse ser usado para garantir o nível de comparação entre os sons. No entanto, entre as simulações, por todas terem utilizado o mesmo som anecóico, uma comparação dessa natureza faz sentido. Seguem, na Figura 7.20, os espectros de *loudness*. Os valores globais para *loudness* (parametrizado para campo difuso) são apresentados na Tabela 7.4, junto com os níveis de pressão sonora, com e sem a ponderação A.

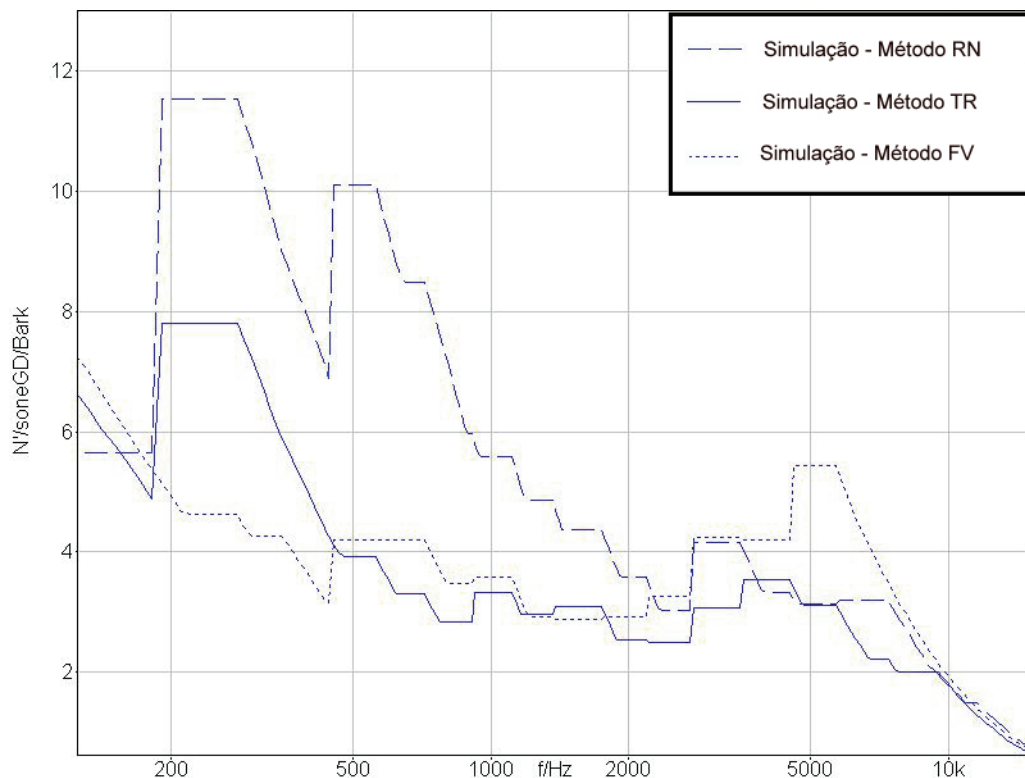


Figura 7.20 – Curvas de *loudness* específico para os resultados das simulações, em bandas de terço de oitava.

Tabela 7.4 – Valores globais para *loudness* e níveis de pressão sonora dos resultados das simulações.

Método	<i>Loudness</i> (sone GD)	NPS (dB)	NPS <sub>A</sub> (dBA)
TR	86,4	99,4	85,6
FV	94,1	100,2	87,6
RN	123	99,8	94,8

Da Tabela 7.4, nota-se que o NPS linear global do resultado analisado do método Fontes Virtuais (FV) é praticamente igual o valor do método Traçado de Pirâmides (RN), do RAYNOISE. No entanto, ao considerar os valores para NPS<sub>A</sub>, que já consideram uma ponderação, ou para o *loudness*, parâmetro que se correlaciona melhor com a percepção auditiva humana, a diferença é considerável, evidenciando o fato de que a interpretação de dados numéricos como o NPS linear pode representar de forma equivocada a qualidade do resultado de auralização.

## **CAPÍTULO 8**

### **CONCLUSÕES**

Neste capítulo são apresentadas as conclusões sobre os resultados do trabalho de forma geral. Também são feitas sugestões para trabalhos futuros.

O processo de simulação acústica, chamado auralização, demonstrou grande potencial para a interpretação de dados científicos, quando esses pretendem expressar uma compreensão mais ampla de um conceito. A audição dos resultados reduz a dificuldade em analisar e comparar fenômenos através de uma única grandeza, ou vários parâmetros isolados. No entanto, alguns aspectos podem comprometer a fidedignidade da simulação, como a equalização do sinal na reprodução binaural e a utilização de diferentes funções de transferência relacionadas à cabeça (HRTFs).

A qualidade da auralização deve ser julgada através de critérios perceptivos. Já que os resultados são audíveis, a percepção deve ser a ferramenta usada para julgar as diferenças. No entanto, esse julgamento também pode se dar por meio de critérios numéricos, desde que estes estejam relacionados aos parâmetros perceptivos em questão.

As gravações binaurais se mostraram eficientes, tanto realizadas através do manequim quanto com pessoas. É importante ressaltar que o sistema de gravação binaural intra-auricular foi desenvolvido no Laboratório de Vibrações e Acústica da UFSC através de um projeto simples e de baixo custo. No entanto, seus resultados puderam ser utilizados como referência para a comparação de algoritmos de simulação acústica.

A elaboração de questionários para as comparações subjetivas precisa de mais estudo, pois a opinião geral dos participantes leigos em acústica revelou dificuldades em se avaliar uma característica do som enquanto outras características também variam.

Para a avaliação do parâmetro timbre, a comparação de som de violão e voz através da audição não se mostrou suficiente na avaliação do desempenho dos algoritmos utilizados, pois os resultados não apresentaram diferenças significativas. Dessa forma, uma análise do som do ar-condicionado por faixas definidas de frequência se fez necessária, para tentar obter informações mais detalhadas sobre o parâmetro em questão. Mesmo assim, fatores relacionados aos métodos de gravação e reprodução, como as características da fonte eletroacústica utilizada, influíram nos resultados, principalmente no nível de pressão sonora estimado para o som de referência.

Os objetivos deste trabalho, que consistem na auralização de fontes sonoras dentro de um ambiente, por meio de diferentes métodos (Traçado de Raios, Fontes Virtuais e Traçado de Pirâmides), seguida da comparação dos resultados com gravações das mesmas fontes dentro do ambiente real, através de análise subjetiva e objetiva, foram concluídos com êxito.

### **Sugestões para trabalhos futuros**

Atualmente, uma das principais limitações na técnica de auralização se encontra na modelagem das fontes sonoras, principalmente no que se refere à direcionalidade das mesmas. Informações detalhadas e precisas referentes à fonte sonora deveriam necessariamente ser utilizadas em qualquer programa de simulação acústica, pois um método nunca pode apresentar resultados de qualidade superior à dos dados de contribuição. Sugere-se o estudo da influência da direcionalidade da fonte sonora na distribuição de som na sala se esta estiver vazia (bastante reverberante), ou no caso de possuir muitos elementos internos, como cadeiras acolchoadas e pessoas, sendo o tempo de reverberação consideravelmente reduzido. O objetivo seria avaliar se a influência da direcionalidade se torna mais evidente no campo acústico com a redução da reverberação da sala. Aconselha-se considerar o ouvinte (receptor) posicionado próximo da fonte, recebendo principalmente o som direto, em um diferente ângulo para cada caso.

Deve haver um esforço direcionado para a melhoria da metodologia de avaliação dos resultados dos métodos de auralização. Sugere-se um estudo direcionado à associação de parâmetros psicoacústicos às diferenças percebidas nos resultados. Através destes parâmetros, seria possível estimar com maior objetividade a influência de cada etapa da auralização (gravação, modelagem, reprodução) na qualidade do resultado.

## REFERÊNCIAS

- ALARCÃO, D.: Acoustic Modelling for virtual spaces. Dissertação para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Electrotécnica e de Computadores apresentada no Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, 2005.
- ALLEN J.B., BERKLEY D.A.; Image method for efficiently simulating small-room acoustics. J. Acoust. Soc. Am. 65, 943, 1979.
- AES, Audio Engineering Society.  
Disponível em: <<http://www.aes.org/publications/preprints/lists/104.html>>, acessada em março de 2007.
- AMBISONICS “The Perceptive Aspects of Ambisonic and Stereophonic Rendering”, disponível em: <[http://gyronymo.free.fr/audio3D/the\\_experimenter\\_corner.html](http://gyronymo.free.fr/audio3D/the_experimenter_corner.html)>, acessada em abril de 2007.
- AUDIENCE, disponível em: <[www.lsi.usp.br/interativos/neac/audience](http://www.lsi.usp.br/interativos/neac/audience)>, acessada em fevereiro de 2007.
- AUDIS, disponível em: <<http://www.eaa-fenestra.org/Products/Documenta/Publications/09-de2>>, acessada em junho de 2007.
- BALLESTEROS, M.L.; Simulação numérica de acústica de salas. Dissertação (mestrado), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1991.
- BLAUERT, J.; Spatial Hearing - The Psychoacoustics of Human Sound Localization. The MIT Press, London, segunda edição, 1997.
- BORISH, J.; Extension of the image model to arbitrary polyhedra. Journal of the Acoustical Society of America, 75(6), 1827-1836, junho de 1984.
- CATT-ACOUSTIC, disponível em: <<http://www.catt.se>>, acessada em março de 2007.
- CHU, W.T.; WARNOCK, A.C.C.; Detailed Directivity of Sound Fields Around Human Talkers, Report B3144.6, Public Works and Government Services, Canada, setembro de 2001.
- CIPIC, disponível em: <<http://interface.cipic.ucdavis.edu>>, acessada em junho de 2007.
- FARIA, R.R.A.; Auralização em ambientes audiovisuais imersivos, Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.
- FARINA, A.; Validation of the pyramid tracing algorithm for sound propagation outdoors: comparison with experimental measurements and with the ISO/DIS 9613 standards, Department of Industrial Engineering, University of Parma, 1995."



- FELS, J.; SCHRÖDER, D.; VORLÄNDER, M., “Room Acoustics Simulations Using Head-Related Transfer Functions of Children and Adults”, Simpósio Internacional de Acústica de Salas, Sevilha, setembro de 2007.
- FERNANDES JÚNIOR, C. L.; Auralização: técnicas de modelagem e simulação binaural de ambientes acústicos virtuais, FEEC/UNICAMP, 2005.
- FONSECA, W.D.; ZMIJEVSKI, T. R.L.; SILVA, Y.A.R.; GERGES, S.N.Y.; "Avaliação de métodos de medição da função de transferência de fones de ouvido tipo circum-auricular", V Congresso Iberoamericano de Acústica, Santiago do Chile, 2006.
- FRIGO, M., JOHNSON, S.G.; The Design and Implementation of FFTW3. Proceedings of IEEE, 93(2), 2005, 216-231.
- FUNKHOUSER, T., CARLBORN, I., ELKO, G., PINGALI, G., SONDHI, M. e WEST, J.; A beam tracing approach to acoustic modeling for interactive virtual environments. ACM Computer Graphics, SIGGRAPH'98 Proceedings, 21–32, julho de 1998.
- GENUIT, K.; FIEBIG, A.; Prediction of Psychoacoustic Parameters, NOISE-CON, Minneapolis, Minnesota, 2005.
- GERGES, S.N.Y.; Ruído - Fundamentos e Controle, segunda edição, NR Editora, 2000.
- GIBBS, B.M., JONES, D.K.; A simple image method for calculating the distribution of sound pressure levels within an enclosure. ACUSTICA, 26, 24-32, 1972.
- GOMES, M.H.A : Implementação de Métodos para a Simulação Acústica e Auralização de Salas, Revista ACÚSTICA E VIBRAÇÕES no. 38, janeiro de 2007.
- GOMES, M.H.A, Tutorial do Método de Fontes Virtuais, 2006.
- HENRIQUE, LUÍS L.; Acústica Musical, Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 2002.
- HOWELL, D. C. Statistical methods for psychology. 3.ed. Belmont: Duxbury Press, 1992.
- HUOPANIEMI, J., KARJALAINEN, M., VÄLIMÄKI, V., HUOTILAINEN, T.; Virtual Instruments in Virtual Rooms – A Real Time Binaural Room Simulation Environment for Physical Models of Musical Instruments, Proc. Int. Computer Music Conf. (ICMC' 94), 455-462, Aarhus, Denmark, setembro de 1994.
- HUOPANIEMI, J., KETTUNEN, K., RAHKONEN, J.; Measurement and Modeling Techniques for Directional Sound Radiation from the Mouth, Proc. IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA'99), New Paltz, outubro de 1999.
- IRCAM, disponível em: <<http://recherche.ircam.fr/equipes/salles/listen/download.html>>, acessada em junho de 2007.
- ISO 3382, Acoustics – Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustic parameters, 1997.

- ITA, disponível em: <<http://www.akustik.rwth-aachen.de>>, acessada em março de 2007.
- KEMAR, disponível em: <<http://sound.media.mit.edu/KEMAR.html>>, acessada em julho de 2007.
- KINSLER, L. E., FREY, A. R., COPPENS, A. B., SANDERS, J. V.; Fundamentals of Acoustics. John Wiley & Sons, New York, terceira edição, 1982.
- KORTCHMAR, L.; Qualidade Sonora em Ambientes de Trabalho. COPPE/UFRJ, Engenharia de Produção, 2000.
- KREYSZIG, E., Advanced Engineering Mathematics, John Wiley & Sons, INC., sétima edição, 600, 1993.
- KULOWSKI A.; Algorithmic representation of the ray tracing technique. Appl. Ac. 18, 449, 1985.
- KUTTRUFF, H.; Auralization of impulse responses modeled on the basis of raytracing results. J. Audio Eng. Soc., 41(11), 876–880, novembro de 1993.
- KUTTRUFF, H.; Room Acoustics. Elsevier Science Publishers LTD, London, terceira edição, 1991.
- LEHNERT, H., BLAUERT J.; A concept for binaural room simulation. Proc. IEEEworkshop on application of signal processing to audio & acoustics, New Paltz, NY, 1989.
- LEITE, R.P., PAUL, S.; Qualidade sonora: conceitos básicos ilustrados com um exemplo da área automotiva, Revista ACÚSTICA E VIBRAÇÕES, no. 37, junho de 2006.
- LEWERS, T.; A combined beam tracing and radiant exchange computer model of room acoustics. Applied Acoustics, 38, 161–178, 1993.
- MATHWORLD, disponível em:<<http://mathworld.wolfram.com/SphericalHarmonic.html>>, acessada em março de 2007.
- MEDRADO, L.O., TENENBAUM, R.A.: Simulação numérica de acústica de salas: implementação do código computacional RAIOS e sua validação por comparação. Em: Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica, Rio de Janeiro, 2002.
- MEYER, J.; Acoustics and the Performance of Music, Verlag das Musikinstrument, Frankfurt/Main, Alemanha, 1978.
- MØLLER, H.; Fundamentals of biaural technology. Applied Acoustics, 36, 171–218, 1992.
- OPPENHEIM, A.V., SCHAFER, R.W.; Discrete-Time Signal Processing, Prentice-Hall, 1999.
- PAUL, S.; Introdução à tecnologia bi-auricular, 2008.
- PORTELA, MARCELO S. Um Sistema de Baixo Custo para o Aluno de Acústica de Salas, Revista ACÚSTICA E VIBRAÇÕES, 37, junho de 2006.
- PTB, The Physikalisch-Technische Bundesanstalt,

disponível em: <<http://www.ptb.de/en/org/1/17/173/richtchar.htm>>, acessada em março de 2007.

RAYNOISE Revision 3.1 – User Manual.

SALFORD, Câmara anecóica da Universidade de Salford, informações disponíveis em: <<http://www.acoustics.salford.ac.uk/facilities/index.php?content=anechoic>>, acessada em fevereiro de 2008.

SHARMONIC, “Spherical Harmonic Components”, disponível em: <[http://members.tripod.com/martin\\_leese/Ambisonic/Harmonic.html](http://members.tripod.com/martin_leese/Ambisonic/Harmonic.html)>, acessada em abril de 2007.

SIEGEL, S.; Estatística não-paramétrica para as ciências do comportamento. Tradução de Alfredo Alves de Farias. São Paulo: Editora McGraw-Hill Ltda, 1975.

SMITH, J. O.; Physical Modeling Synthesis Update, Comput. Music J., 20, 44-56, 1996.

SOKOLNIHOFF, I.S., REDHEFFER, R.M. Mathematics of Physics and Modern Engineering, McGraw-Hill Book, Co., Inc., 1958.

TENENBAUM, R.A., CAMILO, T.S., TORRES, J.C.B., GERGES, S.N.Y.; Hybrid method for numerical simulation of room acoustics with auralization: Part 1 – Theoretical and numerical aspects. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Rio de Janeiro, 2006.

TUKEY, J.W.: Exploratory Data Analysis, Addison-Wesley, Massachusetts, 1977.

VORLÄNDER, M.; Notas de aula da disciplina “Acoustic Simulation and Auralization”, PosMec - UFSC, setembro de 2005.

VORLÄNDER, M.; Engineering Acoustics meets Annoyance Evaluation, Proc, INTERNOISE, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.

VORLÄNDER, M.; Simulation of the Transient and Steadystate Sound Propagation in Rooms Using a New Combined Ray-tracing/Image-source Algorithm. Journal of the Acoustical Society of America, 86(1), 172-178, julho de 1989.

VORLÄNDER, M.; Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit des raumakustischen Schallteilchenmodells. Dissertação para a obtenção do Grau de Doutor em Ciências Naturais apresentada na Faculdade de Eletrotécnica da “Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen”, 1989.

WILCOXON, F. Individual comparisons by ranking methods. Biometrics, 1945.

XIANG, N., BLAUERT, J.; Biaural scale modeling for auralization and prediction of acoustics in auditoria. Applied Acoustics, 38, 267–290, 1993.

ZWICKER, E.; FASTL, H. Psychoacoustics: Facts and Models, segunda edição, Springer-Verlag, Berlin, 1999.

## **APÊNDICES**

## APÊNDICE A

### **Descrição da construção da parede refletora (*baffle*)**

Cada uma das duas placas de MDF utilizadas possui as dimensões 1,83 m de altura por 2,75 m de largura e 0,02 m de espessura. O condicionador de ar possui dimensões 0,26 m de altura por 0,37 m de largura e 0,58 m de comprimento (profundidade). Todas as barras foram soldadas entre si de maneira que se obtivesse a rigidez adequada. As dimensões de cada barra utilizada, de seção retangular, foi de 30 mm por 40 mm e espessura de 3mm.

Foram utilizadas quatro barras, formando um quadrado, para manter a estrutura segura sobre o plano do chão. Para reforçar a estrutura, foram utilizadas duas barras dispostas nas duas diagonais do quadrado.

Para a base, foram utilizadas, nos lados do quadrado, quatro barras de 2 m; para as diagonais, duas barras de 2,83 m. Para a mão francesa, duas barras de 2,68 m. Para as braçadeiras que alinham e fixam as duas placas de MDF, foram utilizadas quatro peças de ferro chato com 1,5 m de comprimento cada. Todos os parafusos utilizados foram do tipo M10, cabeça sextavada, com fixação por arruela e porca.

A estrutura de suporte do aparelho condicionador de ar foi montada em forma de uma mesa, utilizando metalon de seção quadrada de 25 mm, tubular. Foram utilizadas dez barras de 0,5 m e quatro barras de 1,68 m.

Para a saída de água do aparelho, foi instalada uma mangueira que tinha sua saída terminada em um compartimento fechado.

## APÊNDICE B

### Dados da geometria da sala (coordenadas cartesianas)

Coordenadas de entrada dos nós do modelo geométrico das superfícies que compõem a sala estudada. As coordenadas são dadas em metros.

Nó	x	y	z
1	3,28	0	0
2	3,28	0	3,38
3	3,28	3	3,38
4	3,28	3	2
5	3,28	1	2
6	3,28	1	1
7	3,28	3	1
8	3,28	3	0
9	3,28	5,02	0
10	3,28	5,02	3,38
11	2,98	5,02	3,38
12	2,98	5,02	1,95
13	0	5,02	1,95
14	0	5,02	0
15	0	5,02	3,38
16	0	0	3,38
17	0	0	0
18	0,3	0	0
19	1,2	0	0
20	1,2	0	2,15
21	0,3	0	2,15
30	2,32	1,36	0,45
31	2,77	1,36	0,45
32	2,77	3,66	0,45
33	2,32	3,66	0,45
34	2,32	1,36	0,4
35	2,77	1,36	0,4
36	2,77	3,66	0,4
37	2,32	3,66	0,4
38	0,51	3,66	0,45
39	0,51	1,36	0,45

Nó	x	y	z
40	0,96	1,86	0,45
41	0,96	3,66	0,45
42	0,51	3,66	0,4
43	0,51	1,36	0,4
44	0,96	1,36	0,4
45	0,96	3,66	0,4
46	2,77	1,41	0,5
47	2,77	1,41	1
48	2,77	3,61	1
49	2,77	3,61	0,5
50	2,82	1,41	0,5
51	2,82	1,41	1
52	2,82	3,61	1
53	2,82	3,61	0,5
54	0,51	3,61	0,5
55	0,51	3,61	1
56	0,51	1,41	1
57	0,51	1,41	0,5
58	0,46	3,61	0,5
59	0,46	3,61	1
60	0,46	1,41	1
61	0,46	1,41	0,5
62	1,89	4,36	0,45
63	1,39	4,36	0,45
64	1,39	3,91	0,45
65	1,89	3,91	0,45
66	1,89	4,36	0,4
67	1,39	4,36	0,4
68	1,39	3,91	0,4
69	1,89	3,91	0,4
70	1,84	4,36	0,5

Nó	x	y	z
71	1,84	4,36	1
72	1,44	4,36	1
73	1,44	4,36	0,5
74	1,84	4,41	0,5
75	1,84	4,41	1
76	1,44	4,41	1
77	1,44	4,41	0,5
78	1,89	1,11	0,45
79	1,39	1,11	0,45
80	1,39	0,66	0,45
81	1,89	0,66	0,45
82	1,89	1,11	0,4
83	1,39	1,11	0,4
84	1,39	0,66	0,4
85	1,89	0,66	0,4
86	1,44	0,66	0,5
87	1,44	0,66	1
88	1,84	0,66	1
89	1,84	0,66	0,5
90	1,44	0,61	0,5
91	1,44	0,61	1
92	1,84	0,61	1
93	1,84	0,61	0,5

## APÊNDICE C

### Dados da geometria da sala (elementos e materiais)

Descrição dos materiais atribuídos a cada elemento do modelo geométrico das superfícies internas da sala. A sequência de nós segue a ordem correta (“regra da mão direita”) para que o vetor normal à superfície aponte para a direção adequada.

<b>nº</b>	<b>Materiais</b>	<b>Elemento</b>	<b>Seqüência de nós</b>
1	Alvenaria	Parede - parte em L	2 3 4 5 6 7 8 1
2	Alvenaria	Parede - complemento	3 10 9 8
3	PVC	Quadro branco	6 5 4 7
4	Alvenaria	Parede da janela	9 10 11 12 13 14
5	Vidro	Janela	11 15 13 12
6	Gesso	Parede para sala vizinha	14 15 16 17
7	Gesso	Parede para o corredor	19 20 21 18 17 16 2 1
8	Madeira	Porta	18 21 20 19
9	Mármore	Piso	1 9 14 17
10	Concreto	Teto	2 16 15 10
11	Madeira	Mesa - parte superior	22 23 24 25
12	Madeira	Mesa - parte lateral	26 27 23 22
13	Madeira	Mesa - parte lateral	27 28 24 23
14	Madeira	Mesa - parte lateral	28 29 25 24
15	Madeira	Mesa - parte lateral	22 25 29 26
16	Madeira	Mesa - parte inferior	26 29 28 27
17	Acolchoado	Assento direita cima	30 31 32 33
18	Acolchoado	Assento direita lateral	30 33 37 34
19	Acolchoado	Assento direita lateral	34 35 31 30
20	Acolchoado	Assento direita lateral	30 34 35 31
21	Acolchoado	Assento direita lateral	31 35 36 32
22	Forro	Assento direita baixo	30 34 35 31
23	Acolchoado	Assento esquerda cima	46 47 48 49
24	Acolchoado	Assento esquerda lateral	46 49 53 50
25	Acolchoado	Assento esquerda lateral	50 51 47 46
26	Acolchoado	Assento esquerda lateral	46 50 51 47
27	Acolchoado	Assento esquerda lateral	47 51 52 48
28	Forro	Assento esquerda baixo	46 50 51 47
29	Acolchoado	Encosto direita frente	46 47 48 49

<b>nº</b>	<b>Materiais</b>	<b>Elemento</b>	<b>Seqüência de nós</b>
30	Forro couro	Encosto direita costas	50 53 52 51
31	Acolchoado	Encosto direita lado	51 52 48 47
32	Acolchoado	Encosto direita lado	46 49 53 50
33	Acolchoado	Encosto direita lado	50 51 47 46
34	Acolchoado	Encosto direita lado	49 48 52 53
35	Acolchoado	Encosto esquerda frente	54 55 56 57
36	Forro couro	Encosto esquerda costas	58 61 60 59
37	Acolchoado	Encosto esquerda lado	59 60 56 55
38	Acolchoado	Encosto esquerda lado	54 57 61 58
39	Acolchoado	Encosto esquerda lado	58 59 55 54
40	Acolchoado	Encosto esquerda lado	57 56 60 61
41	Acolchoado	Assento cabeceira D cima	62 63 64 65
42	Forro couro	Assento cabeceira D baixo	66 69 68 67
43	Acolchoado	Assento cabeceira D lado	67 68 64 63
44	Acolchoado	Assento cabeceira D lado	62 65 69 66
45	Acolchoado	Assento cabeceira D lado	66 67 63 62
46	Acolchoado	Assento cabeceira D lado	65 64 68 69
47	Acolchoado	Encosto cabeceira D frente	70 71 72 73
48	Forro couro	Encosto cabeceira D costas	74 77 76 75
49	Acolchoado	Encosto cabeceira D lado	75 76 72 71
50	Acolchoado	Encosto cabeceira D lado	70 73 77 74
51	Acolchoado	Encosto cabeceira D lado	74 75 71 70
52	Acolchoado	Encosto cabeceira D lado	73 72 76 77
53	Acolchoado	Assento cabeceira H cima	78 79 80 81
54	Forro couro	Assento cabeceira H baixo	82 85 84 83
55	Acolchoado	Assento cabeceira H lado	83 84 80 79
56	Acolchoado	Assento cabeceira H lado	78 81 85 82
57	Acolchoado	Assento cabeceira H lado	82 83 79 78
58	Acolchoado	Assento cabeceira H lado	81 80 84 85
59	Acolchoado	Encosto cabeceira H frente	86 87 88 89
60	Forro couro	Encosto cabeceira H costas	90 93 92 91
61	Acolchoado	Encosto cabeceira H lado	91 92 88 87
62	Acolchoado	Encosto cabeceira H lado	86 89 93 90
63	Acolchoado	Encosto cabeceira H lado	90 91 87 86
64	Acolchoado	Encosto cabeceira H lado	89 88 92 93



## APÊNDICE D

### Histogramas – dados intervalares

Os dados intervalares resultantes da avaliação subjetiva dos métodos deram origem aos histogramas. Para estimar a distribuição dos dados, são apresentadas também as curvas de distribuição normal.

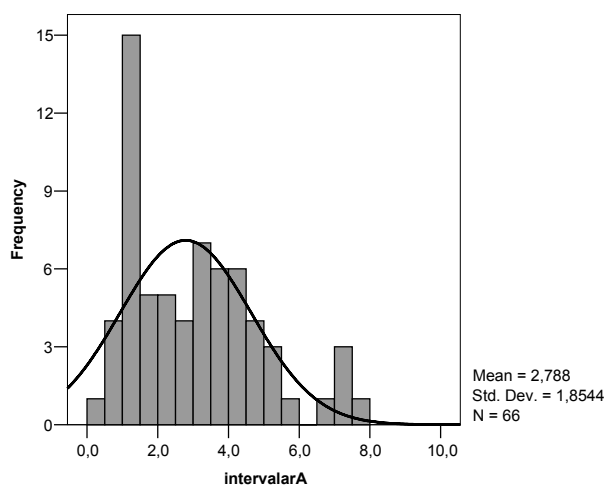


Figura D.01 - Histograma dos dados intervalares para o parâmetro Localização da fonte violão - Método FV.

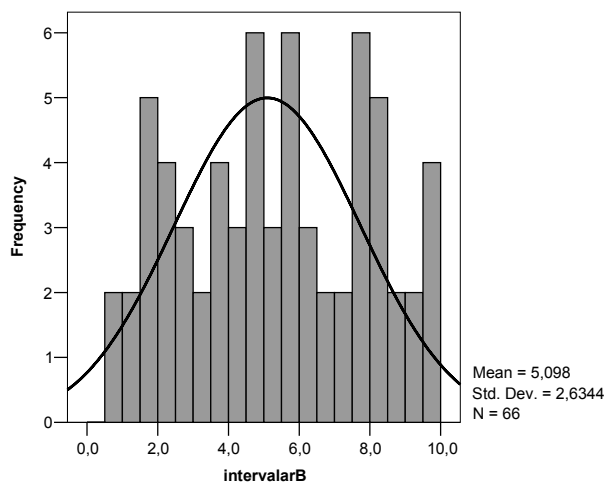


Figura D.02 - Histograma dos dados intervalares para o parâmetro Localização da fonte violão - Método RN.

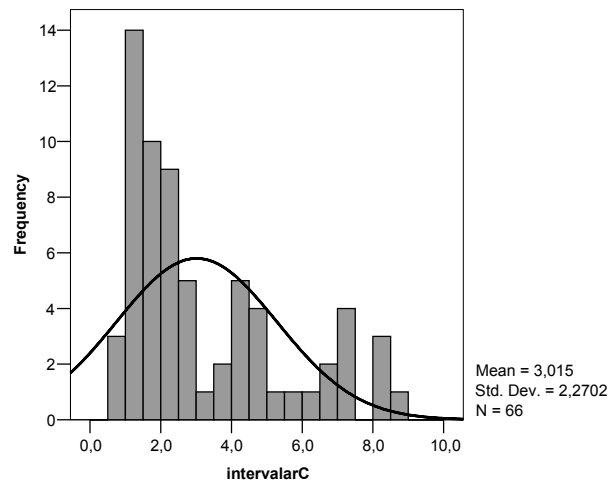


Figura D.03 - Histograma dos dados intervalares para o parâmetro Localização da fonte violão - Método TR.

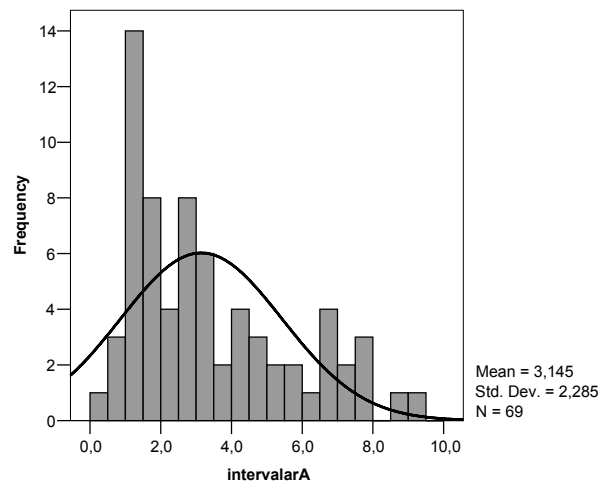


Figura D.04 - Histograma dos dados intervalares para o parâmetro Localização da fonte voz - Método FV.

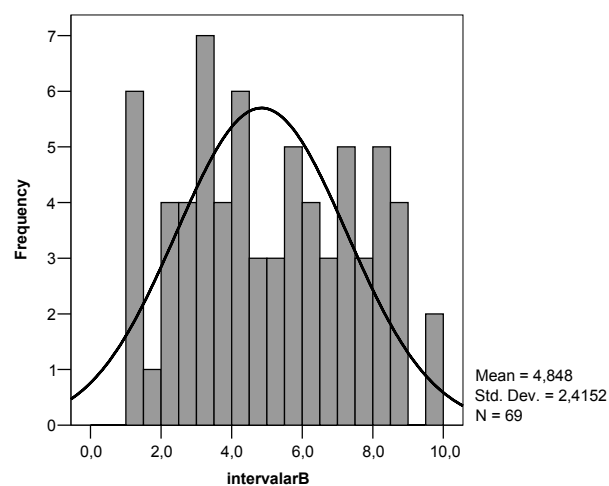


Figura D.05 - Histograma dos dados intervalares para o parâmetro Localização da fonte voz - Método RN.

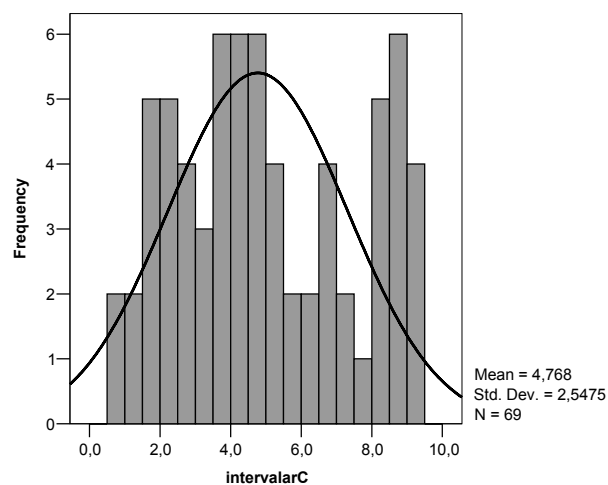


Figura D.06 - Histograma dos dados intervalares para o parâmetro Localização da fonte voz - Método TR.

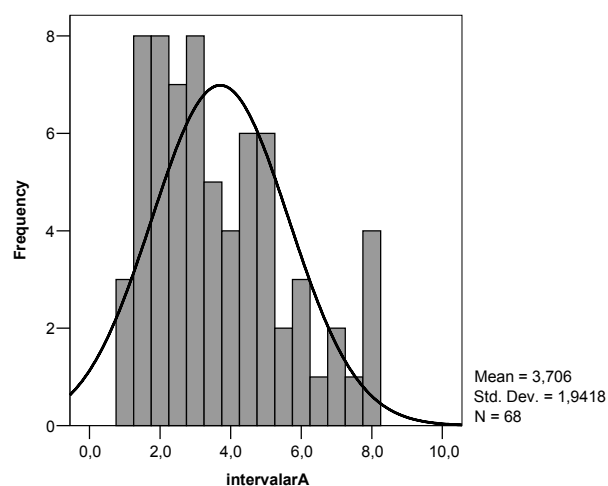


Figura D.07 - Histograma dos dados intervalares para o parâmetro Reverberação da fonte violão - Método FV.

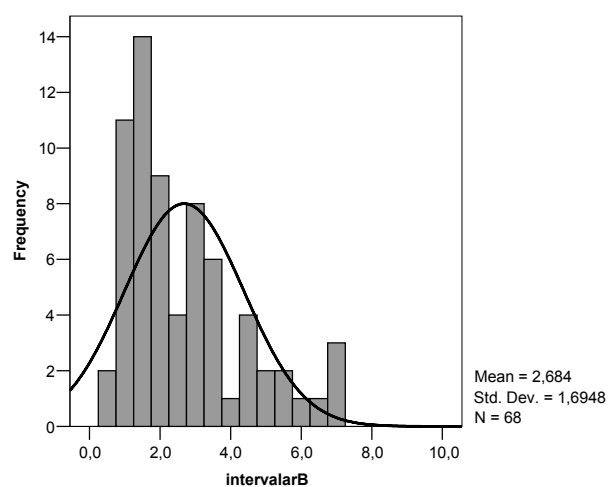


Figura D.08 - Histograma dos dados intervalares para o parâmetro Reverberação da fonte violão - Método RN.

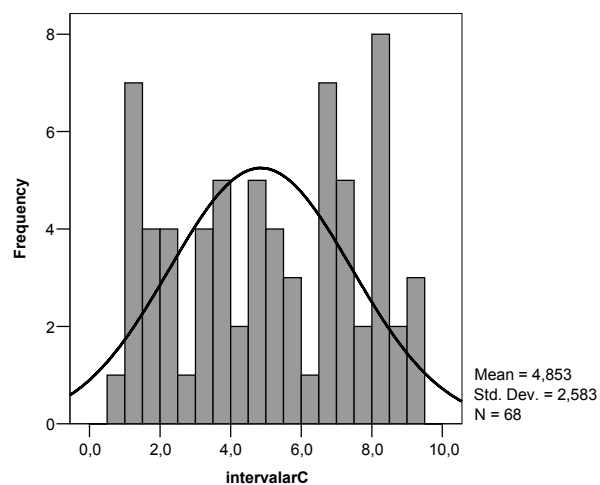


Figura D.08 - Histograma dos dados intervalares para o parâmetro Reverberação da fonte violão - Método TR.

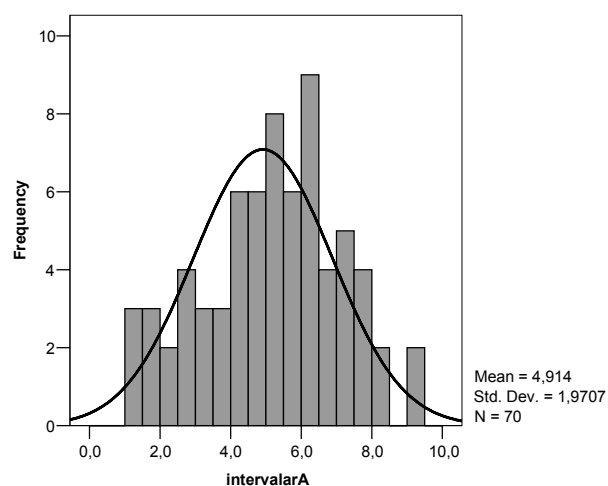


Figura D.09 - Histograma dos dados intervalares para o parâmetro Reverberação da fonte voz - Método FV.

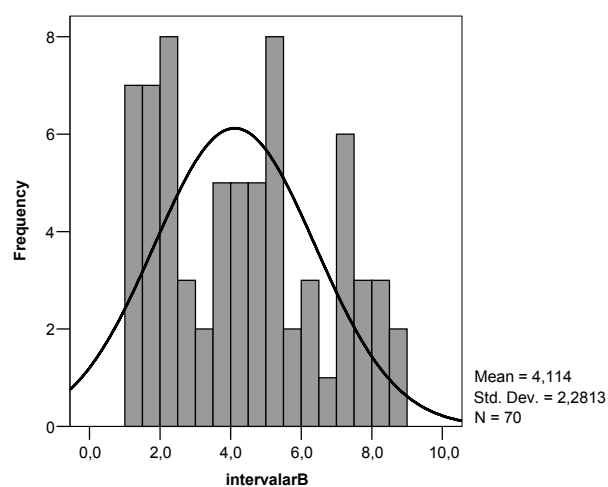


Figura D.10 - Histograma dos dados intervalares para o parâmetro Reverberação da fonte voz - Método RN.

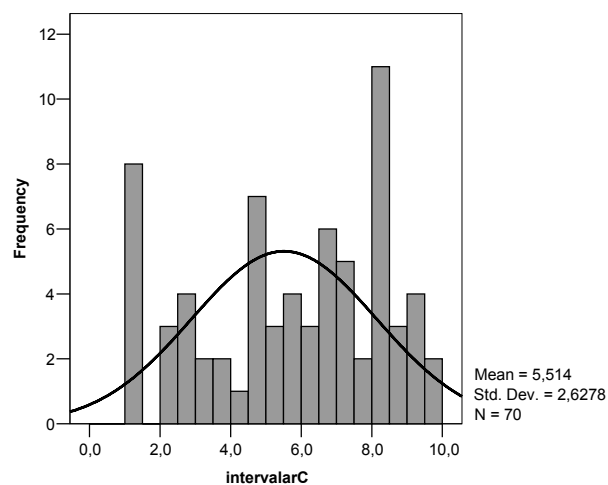


Figura D.11 - Histograma dos dados intervalares para o parâmetro Reverberação da fonte voz - Método TR.

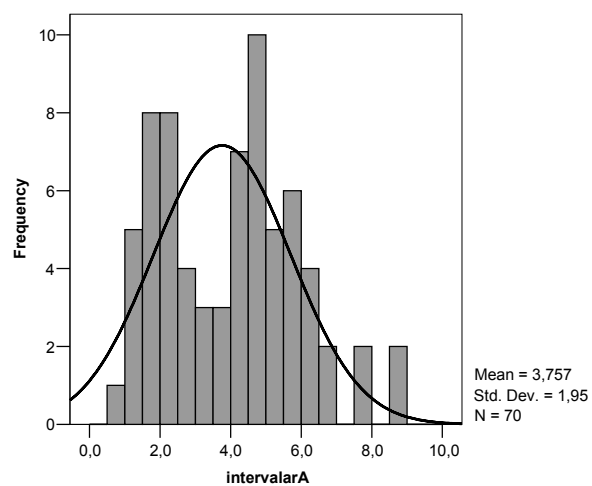


Figura D.12 - Histograma dos dados intervalares para o parâmetro Timbre da fonte violão - Método FV.

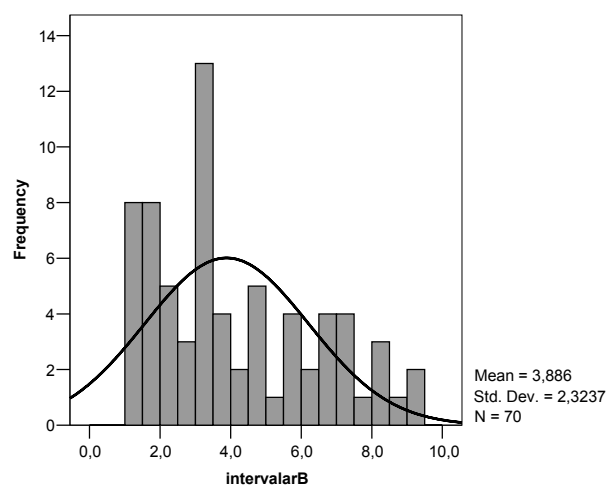


Figura D.13 - Histograma dos dados intervalares para o parâmetro Timbre da fonte violão - Método RN.

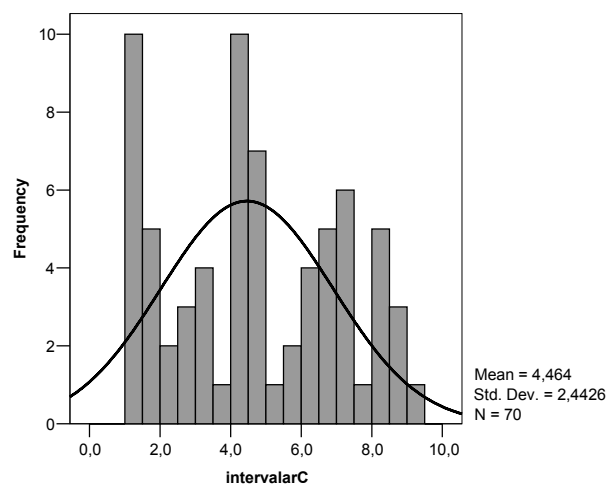


Figura D.14 - Histograma dos dados intervalares para o parâmetro Timbre da fonte violão - Método TR.

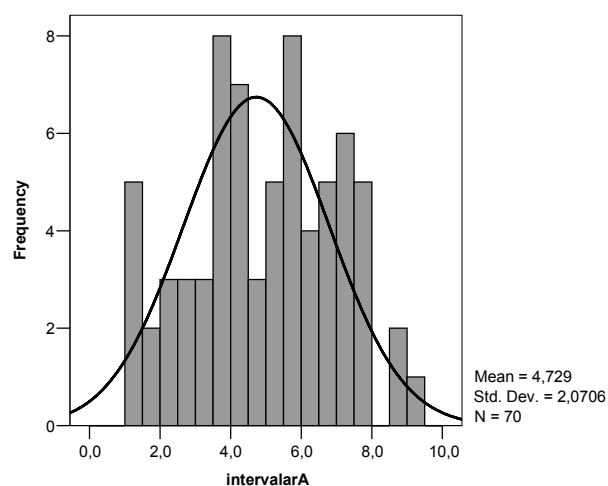


Figura D.15 - Histograma dos dados intervalares para o parâmetro Timbre da fonte voz - Método FV.

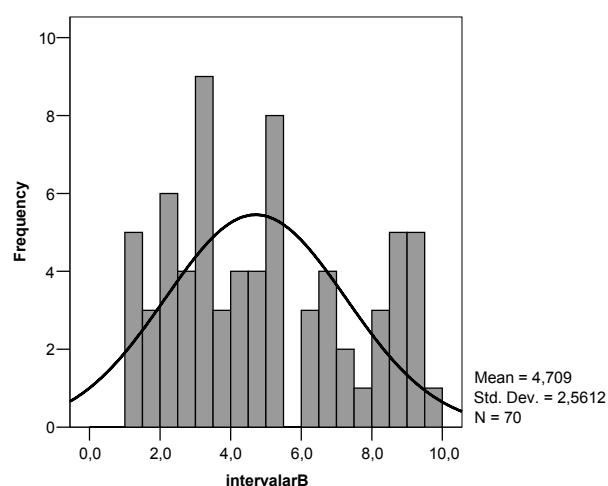


Figura D.16 - Histograma dos dados intervalares para o parâmetro Timbre da fonte voz - Método RN.

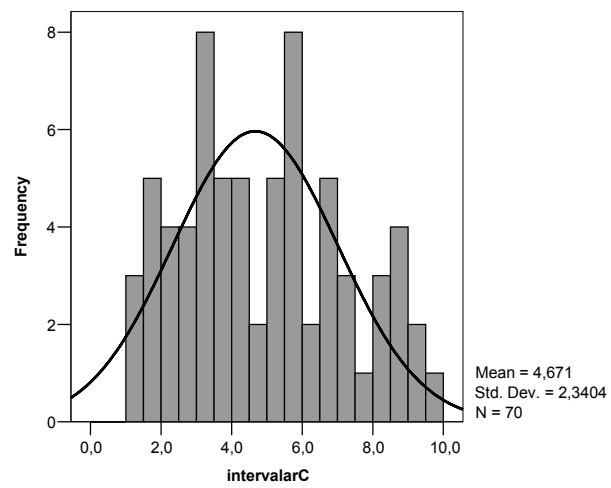


Figura D.17 - Histograma dos dados intervalares para o parâmetro Timbre da fonte voz - Método TR.

## APÊNDICE E

### Espectrogramas

O espectrograma é um gráfico bidimensional do espectro do sinal analisado ao longo do tempo, com a frequência espectral no eixo das ordenadas, o tempo no eixo das abscissas e a intensidade espectral denotada por gradações de cor. Corresponde aos espectros consecutivos (transformada de Fourier) de quadros adjacentes do sinal, dispostos verticalmente. Os espectrogramas representados pelas Figuras E.01 a E.04 referem-se ao ruído do ar-condicionado, relativos somente à posição 2, canal esquerdo.

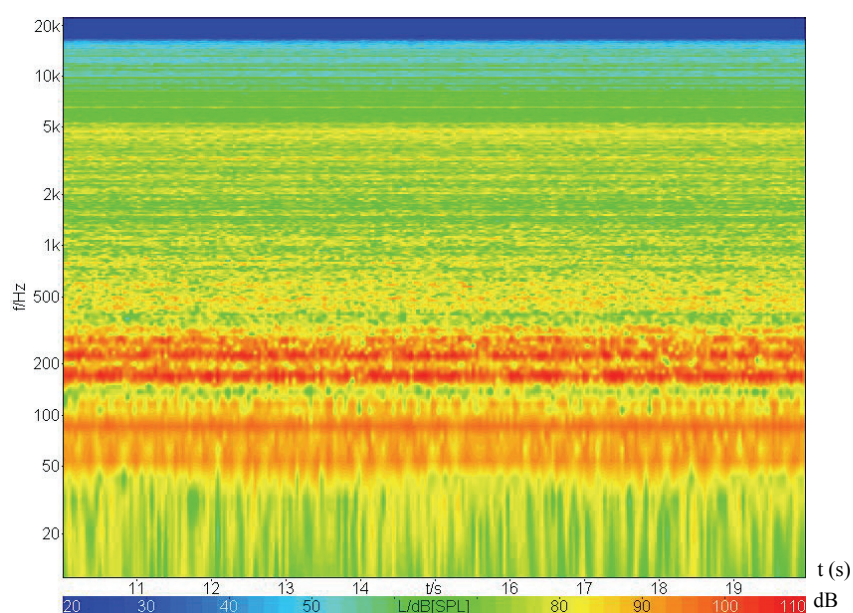


Figura E.01 – Espectrograma da gravação de referência.

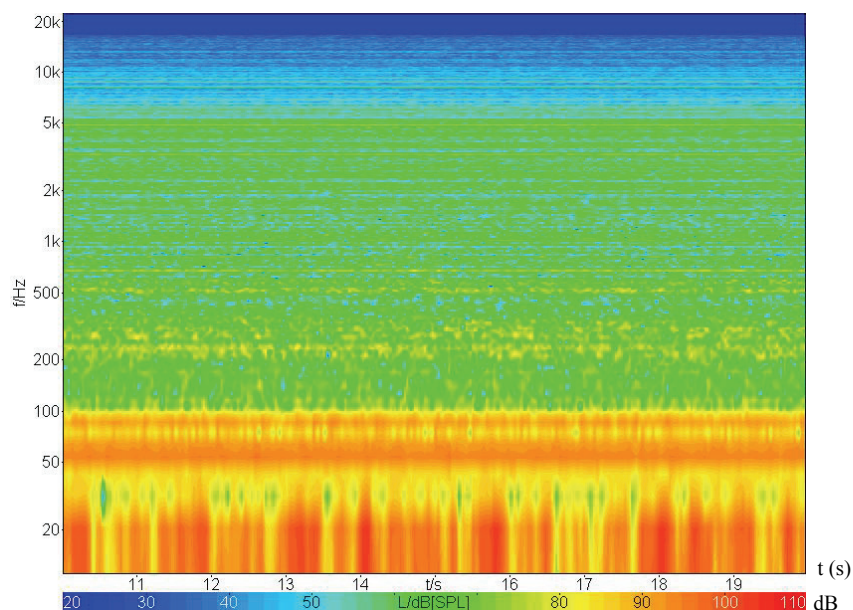


Figura E.02 – Espectrograma do resultado do Método de Fontes Virtuais (MÓDULOS).



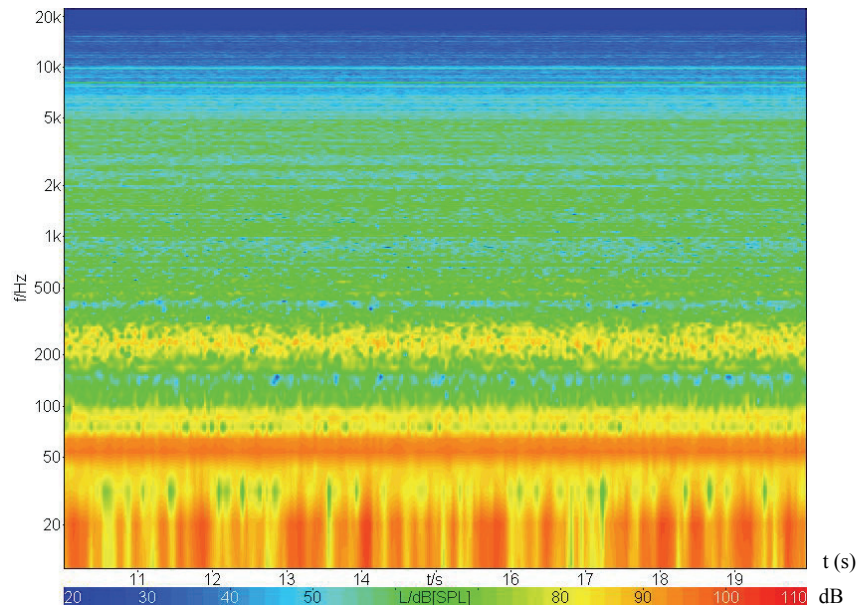


Figura E.03 – Espectrograma do resultado do Método de Traçado de Raios (MÓDULOS).

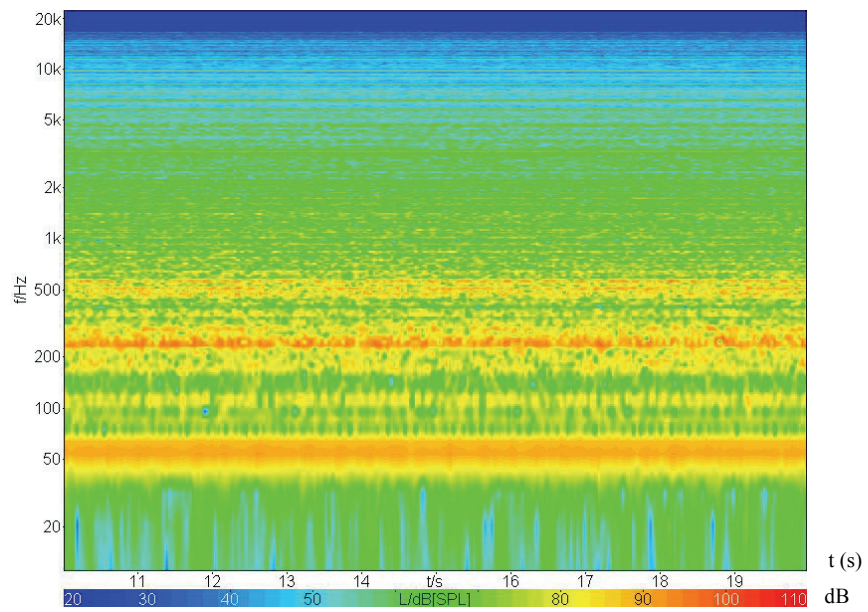


Figura E.04 – Espectrograma do resultado do Método de Traçado de Pirâmides (RAYNOISE).

## **APÊNDICE F**

### **Conteúdo do CD**

O CD que acompanha este trabalho contém 27 faixas de áudio e 3 documentos relacionados ao estudo realizado. É recomendado ao leitor considerar as configurações de fonte e receptor descritas e ilustradas no Capítulo 6, no item 6.6.

1. Gravação anecóica da voz
2. Gravação anecóica do ar-condicionado
3. Gravação anecóica do violão
4. Gravação biaural de referência da configuração 1 (violão)
5. Gravação biaural de referência da configuração 2 (violão)
6. Gravação biaural de referência da configuração 3 (voz)
7. Gravação biaural de referência da configuração 4 (voz)
8. Gravação biaural de referência da configuração 5 (ar-condicionado)
9. Gravação biaural de referência da configuração 6 (ar-condicionado)
10. Auralização da configuração 1 – Método FV (violão)
11. Auralização da configuração 1 – Método RN (violão)
12. Auralização da configuração 1 – Método TR (violão)
13. Auralização da configuração 2 – Método FV (violão)
14. Auralização da configuração 2 – Método RN (violão)
15. Auralização da configuração 2 – Método TR (violão)
16. Auralização da configuração 3 – Método FV (voz)
17. Auralização da configuração 3 – Método RN (voz)
18. Auralização da configuração 3 – Método TR (voz)
19. Auralização da configuração 4 – Método FV (voz)
20. Auralização da configuração 4 – Método RN (voz)
21. Auralização da configuração 4 – Método TR (voz)
22. Auralização da configuração 5 – Método FV (ar-condicionado)
23. Auralização da configuração 5 – Método RN (ar-condicionado)
24. Auralização da configuração 5 – Método TR (ar-condicionado)
25. Auralização da configuração 6 – Método FV (ar-condicionado)
26. Auralização da configuração 6 – Método RN (ar-condicionado)
27. Auralização da configuração 6 – Método TR (ar-condicionado)

Documentos:

- A. Apresentação *Powerpoint* de introdução ao questionário de comparação subjetiva;
- B. Apresentação *Powerpoint* – questionário de comparação subjetiva;

## APÊNDICE G

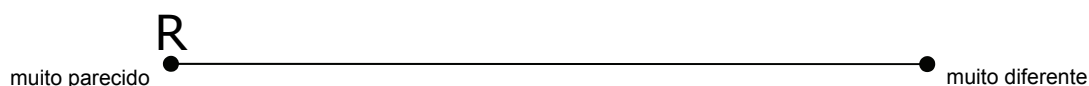
### Formulário para respostas da comparação subjetiva de sons

A qualidade dos resultados de auralização foi avaliada por meio de avaliação subjetiva, utilizando como instrumento psicométrico uma escala em linha. O participante, após escutar a referência e cada som gerado por um dos três métodos, Traçado de Raios, Fontes Virtuais e Traçado de Pirâmides, deveria classificar os sons em relação à referência, utilizando o formulário apresentado a seguir.

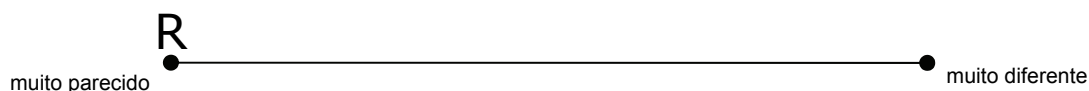
#### LOCALIZAÇÃO

---

##### Comparação 1



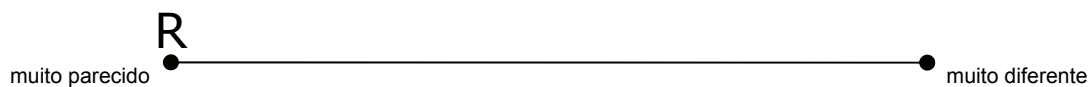
##### Comparação 2



##### Comparação 3



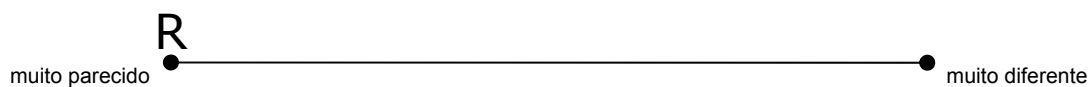
##### Comparação 4



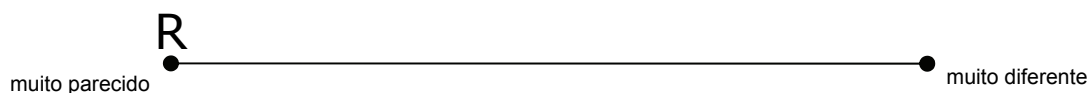
#### REVERBERAÇÃO

---

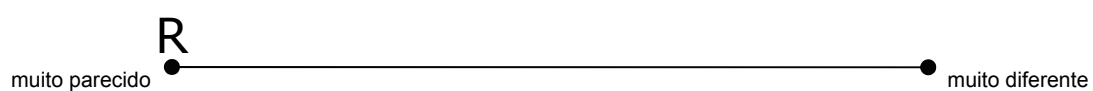
##### Comparação 5



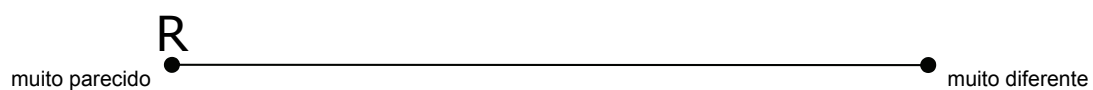
##### Comparação 6



### Comparação 7



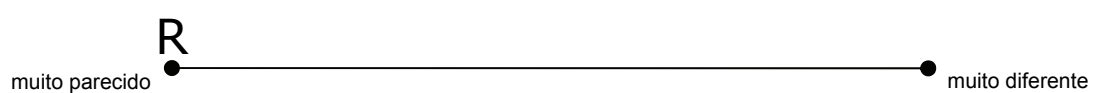
### Comparação 8



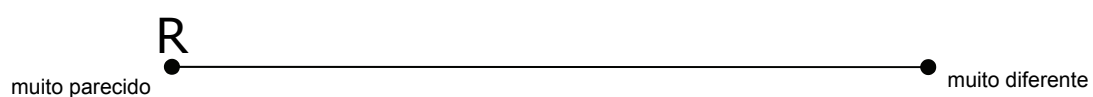
## TIMBRE

---

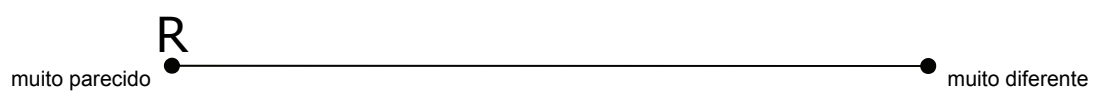
### Comparação 9



### Comparação 10



### Comparação 11



### Comparação 12

